

INFLUENCIA DEL ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN EL FACTOR DE  
SEGURIDAD PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES

LEONARDO LEURO MARTINEZ  
LEONARDO ANDRES SANCHEZ RODRIGUEZ



UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
BOGOTÁ, D.C.  
2015

INFLUENCIA DEL ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN EL FACTOR DE  
SEGURIDAD PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES

LEONARDO LEURO MARTINEZ  
LEONARDO ANDRES SANCHEZ RODRIGUEZ

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por título de ingeniero civil

Asesor Disciplinar:  
IC, MSc Andrés Rodríguez Granados

Asesor Metodológico:  
Lic., MSc. Bibiana Carolina Gómez Salgado

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.  
2015

## INTRODUCCIÓN

Una de las principales problemáticas que afecta la infraestructura nacional son los procesos de remoción en masa, que se generan principalmente por las presiones hidrostáticas que afectan como factor determinante los taludes y laderas naturales de la geografía, situación que finalmente repercute de manera directa en la economía generando un impacto social ligado a esta problemática, el cual se puede observar en la afectación de las vías de comunicación entre las distintas regiones del país.

Por este motivo en el presente proyecto de grado se hace un planteamiento del problema abordado desde las condiciones geográficas y climáticas, que afectan de manera directa el manejo de aguas subterráneas, que finalmente terminan siendo los factores detonantes de los procesos de inestabilidad causados por la disminución de resistencia al corte de los suelos que componen los taludes; lo que se ve reflejado en los factores de seguridad bajos cuando se realiza análisis de estabilidad para los mismos y que se manifiesta con la presencia de los procesos de remoción en masa anteriormente mencionados.

Partiendo de esta problemática se propone desde el objetivo general la evaluación del efecto causado al factor de seguridad, mediante el abatimiento del nivel freático utilizando para ello drenes sub-horizontales como método de mejora en la estabilidad de taludes, para lo cual se empleó un software especializado para temas geotécnicos, como lo es el Slide®, de la casa Rocscience® el cual dentro de sus herramientas cuenta con la posibilidad de realizar análisis por medio de elementos finitos.

Por ultimo como finalidad del presente proyecto de grado, se generan una serie de gráficos que tiene como propósito el facilitar los procesos de escogencia de un sistema adecuado de drenes sub-horizontales, los cuales van a ser empleados en el momento de llevar a cabo un proyecto donde se requiera generar procesos de abatimiento del nivel freático con el fin de mejorar las condiciones geotécnicas del talud que este interviniendo.

## **GENERALIDADES**

### **LINEA DE INVESTIGACION PRIMARIA**

Geotecnia para el desarrollo de la infra estructura física regional sostenible y la calidad de vida. GGIR-UGC.

### **SUBLINEA DE INVESTIGACION**

Riesgos geotécnicos

### **SEMILLERO DE INVESTIGACIÓN**

Semillero de investigación en geotecnia unida gran colombiana: SIGUC

### **NOMBRE DE LOS INVESTIGADORES**

Leonardo Leuro Martínez  
Leonardo Andrés Sánchez Rodríguez

### **NOMBRE DE LOS ASESORES**

IC., MSc Andrés Rodríguez Granados (Asesor Disciplinar)  
Lic. MSc. Bibiana Carolina Gómez Salgado (Asesor Metodológico)

## ÍNDICE DE CONTENIDO

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 1.     | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                        | 8  |
| 2.     | JUSTIFICACIÓN .....                                     | 9  |
| 3.     | OBJETIVOS .....   | 10 |
| 3.1.   | Objetivo general .....                                  | 10 |
| 3.2.   | Objetivos específicos.....                              | 10 |
| 4.     | ANTECEDENTES .....                                      | 11 |
| 4.1.   | Antecedentes a nivel internacional .....                | 11 |
| 4.2.   | Antecedentes a nivel nacional .....                     | 11 |
| 4.3.   | Antecedentes a nivel Bogotá .....                       | 12 |
| 4.4.   | Aportes al presente trabajo de grado.....               | 13 |
| 5.     | MARCO REFERENCIAL.....                                  | 14 |
| 5.1.   | Marco geográfico.....                                   | 14 |
| 5.2.   | Marco legal.....  | 15 |
| 5.2.1. | Regulaciones incluidas en los códigos .....             | 16 |
| 5.2.2. | Efectividad de los códigos de Laderas.....              | 16 |
| 5.2.3. | Escala de los códigos.....                              | 16 |
| 5.2.4. | Objetivos de los códigos.....                           | 16 |
| 5.2.5. | Aplicación del código y actividades que se regulan..... | 17 |
| 5.2.6. | Estudios Mínimos Exigidos.....                          | 17 |
| 5.3.   | MARCO REFERENCIAL TEORICO .....                         | 18 |
| 5.3.1. | Dren .....  | 18 |
| 5.3.2. | Estabilidad de taludes.....                             | 21 |
| 5.3.3. | Ecuaciones que rigen el flujo en un suelo.....          | 27 |
| 5.3.4. | Clasificación de suelos.....                            | 36 |
| 5.3.5. | Software Slide versión 6.0 de la casa Rocscience.....   | 43 |
| 6.     | Diseño metodológico.....                                | 45 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 6.1.   | Enfoque metodológico .....  | 45 |
| 6.2.   | Tipo de investigación .....   | 45 |
| 6.3.   | Fases de la investigación .....   | 45 |
| 6.3.1. | Fase I .....  | 45 |
| 6.3.2. | Fase II .....   | 45 |
| 6.3.3. | Fase III .....  | 46 |
| 7.     | Desarrollo METODOLOGICO .....   | 47 |
| 7.1.   | Condición I.....  | 48 |
| 7.2.   | Condición ii .....  | 48 |
| 7.3.   | Condición iii .....   | 49 |
| 7.4.   | Recomendación final .....   | 49 |
| 8.     | MODELO INICIAL .....  | 50 |
| 8.1.   | Parámetros geométricos de los taludes.....  | 50 |
| 8.2.   | Parámetros geo-mecánicos de los materiales a utilizar. ....                                       | 50 |
| 8.3.   | Coefficientes de permeabilidad de los materiales utilizados. ....                                 | 52 |
| 8.4.   | Coefficiente sísmico empleado en las modelaciones pseudo-estáticas. ....                          | 53 |
| 8.5.   | Condiciones de frontera utilizadas por el software Slide® en el método de elementos finitos. .... | 53 |
| 8.6.   | resultados de las modelaciones en condición inicial. ....   | 55 |
| 8.7.   | Parámetros geométricos de los drenes a utilizar. ....   | 56 |
| 9.     | RESULTADOS.....   | 57 |
| 10.    | Análisis de resultados .....  | 58 |
| 10.1.  | ANALISIS DE REDES DE FLUJO.....   | 58 |
| 10.2.  | Material TIPO arcilla.....  | 59 |
| 10.3.  | material tipo limo.....   | 61 |
| 10.4.  | Material arenas .....   | 63 |
| 10.5.  | Abatimiento del nivel freático medido en la corona del talud. ....                                | 64 |
| 10.6.  | Abatimiento del nivel freático medido a la mitad del talud. ....                                  | 65 |
| 11.    | CONCLUSIONES .....  | 73 |
| 12.    | RECOMENDACIONES .....   | 75 |
| 13.    | BIBLIOGRAFIA .....  | 76 |

## INDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1 Secuencia de entrega de informes de estudios previos.....                  | 17 |
| Tabla 2 Métodos de análisis de estabilizada de taludes .....                       | 26 |
| Tabla 3 Dimensiones nominales. Serie Estándar (EEUU) .....                         | 38 |
| Tabla 4 Valores típicos de límite líquido y plástico.....                          | 40 |
| Tabla 5 Valores del coeficiente de permeabilidad para varios tipos de suelo .....  | 42 |
| Tabla 6 Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos .....          | 42 |
| Tabla 7 Relación aproximada entre la clasificación unificada y la permeabilidad .. | 43 |
| Tabla 8 Convenciones del método de elementos finitos para el software Slide.....   | 44 |
| Tabla 9 Fase uno del diseño metodológico .....                                     | 45 |
| Tabla 10 Fase dos del diseño metodológico.....                                     | 45 |
| Tabla 11 Fase tres del diseño metodológico .....                                   | 46 |
| Tabla 12 Resumen de anexos proyecto de investigación.....                          | 57 |

## **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Colombia se encuentra ubicada en una zona geográfica donde el factor climático es bastante variable lo cual afecta de manera directa el manejo de aguas subterráneas en los suelos, generando una disminución en la estabilidad de los taludes tanto naturales (laderas), como artificiales existentes a lo largo del territorio nacional como consecuencia del aumento en la presión de poros y disminución en la resistencia al corte, los cuales son factores determinantes para estabilidad de los mismos; teniendo como resultado final la gran influencia de problemas de deslizamientos con un alto número de damnificados a lo largo del territorio nacional.

Con base en lo anterior y a una revisión realizada en literatura que abarca el manejo de aguas subterráneas en los suelos, se pudo deducir que el nivel freático de una zona puede llegar a ser variable con diferencias de alturas, que en casos especiales pueden llegar a fluctuar más del 50 % tomando lecturas de la misma, diariamente o semanalmente, lo cual se puede evidenciar en el estudio “Relación entre los deslizamientos y la dinámica climática en Colombia”, desarrollado por Martínez A., Corrales C., Rodríguez P., & Sánchez C., en el año 2.010.

De acuerdo con esta problemática se plantea la siguiente pregunta, la cual será utilizada como base del presente proyecto de investigación:

¿Cuál es el efecto producido por el abatimiento del nivel freático, mediante la inclusión de drenes horizontales, en el factor de seguridad para la estabilidad de taludes?

## 2. JUSTIFICACIÓN

En Colombia los deslizamientos son asociados a distintas causas, de las cuales, y para efectos del presente trabajo se van a tener en cuenta los deslizamientos provocados por efectos de aumento en la presión de poros por aguas sub superficiales. Este tipo de fallas son asociadas principalmente a la falta de obras que permitan manejar adecuadamente el flujo subterráneo.

Las medidas de mitigación que se utilizan están enfocadas en el manejo del agua sub superficial, con el fin de reducir la presión de poros y con esto aumentar el factor de seguridad del talud.

Este trabajo de grado pretende mostrar como mediante el uso de drenes sub-horizontales, se puede generar una serie de gráficas, con las cuales se puede tomar una mejor determinación, hacia la utilización de obras de mitigación de deslizamientos y su efectividad.

Dado que en la mayoría de los casos el diseño de drenes horizontales (también conocidos como drenes sub - horizontales o de penetración) se realiza mediante drenes prescriptivos de acuerdo al Manual de drenaje para carreteras del instituto nacional de vías<sup>1</sup>, y aunque en la geotecnia o mecánica de suelos se sabe que el abatir el nivel freático mejora las condiciones de resistencia al corte, con el trabajo de investigación planteado se quiere llegar a obtener un método más aproximado.

Este trabajo de grado pretende avanzar en los métodos empíricos comúnmente empleados en el diseño de drenes horizontales, con el fin de que la implementación de estos genere una solución adecuada para contrarrestar los problemas de estabilidad generados por el nivel freático.

Se tiene en cuenta el factor de seguridad es calculado por medio del método de equilibrio limite y el abatimiento del nivel freático generado por la implementación de drenes sub-horizontales está calculado por medio del método de elementos finitos.

---

<sup>1</sup> MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Manual de drenaje para carreteras, Bogotá D.C., Colombia, Consorcio ALFA, 2009, p 5-12.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el efecto del abatimiento del nivel freático, mediante la inclusión de drenes sub-horizontales en el cálculo del factor de seguridad en la estabilidad de taludes.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Definir los parámetros geotécnicos de las arenas, limos y arcillas, parámetros geométricos de los distintos taludes y drenes que serán empleados como base para la modelación.

Analizar los resultados producto de la modelación en una serie de taludes en función de su altura, inclinación y longitud de dren por medio del software Slide®, de la casa Rocscience<sup>2</sup>, con el fin de calcular el factor de seguridad y el efecto que se presenta con la implementación de drenes sub-horizontales.

Generar una serie de ábacos para tres tipos de materiales utilizados en las modelaciones realizadas, que permitan una mayor aproximación en el cálculo de abatimiento para drenes horizontales y el mejoramiento del factor de seguridad en la serie de taludes anteriormente mencionados.

---

<sup>2</sup> software Slide®, de la casa Rocscience®

#### **4. ANTECEDENTES**

Para el presente proyecto de grado se consultaron algunos proyectos, artículos, estudios y libros relacionados el tema del abatimiento del nivel freático y su efecto en el cálculo del factor de seguridad en taludes.

Los artículos se presentan dependiendo de su origen, primero los internacionales, luego los nacionales y por último los que se realizaron en la ciudad de Bogotá.

##### **4.1. ANTECEDENTES A NIVEL INTERNACIONAL**

En el año 2013, en la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, se presentó un proyecto que tiene como título “Modelación Numérica 3D para Estabilización de Taludes Utilizando Drenes Sub-horizontales”, el objetivo principal es desarrollar y determinar las variables más importantes para el diseño adecuado del sistema de drenaje, por medio de un modelo numérico matemático en 3D. Este trabajo llegó a las conclusiones que el talud no falla en una franja limitada, sino que su falla se ve en tres dimensiones y no en dos lo cual es fundamental al momento de analizar la estabilidad del talud, de igual manera se encontró que el dren en laboratorio está en presión lo cual no se tiene presión de poros nula y no se genera el gradiente de energía suficiente, por lo cual se concluye que es fundamental el diseño del diámetro del dren para que trabaje según el largo y espaciamiento dispuesto. De este trabajo también se concluye que utilizar drenes horizontales es una medida alternativa para estabilizar un talud.

En abril de 1997, el IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua), el Instituto de Geofísica de la UNAM, la Universidad de Oxford y la Facultad de Ciencias de la UMAM, presentaron un proyecto que llevaba por título “Problemas directos e inversos para el abatimiento del manto freático”, en el cual se estudia el problema directo de la evolución temporal del manto freático. Se encuentra la solución para el régimen permanente, con el análisis de grupo de la ecuación de Boussinesq para infiltración, se halla la solución del régimen transitorio. El método se generaliza fácilmente a cualquier dimensión. Para cerrar el ciclo, se resuelve el problema inverso de la porosidad drenable para un acuífero freático. Este artículo presenta la solución en dos partes, en la primera estudiaron el problema directo, dentro del cual se halló la fórmula para el nivel freático tanto en régimen permanente como en el transitorio. En la segunda, para el problema inverso se hizo uso del teorema de Boussinesq, acerca de la factorización del coeficiente de difusión y la dependencia funcional que puede inferir de su combinación con el análisis de grupo de la ecuación diferencial.

##### **4.2. ANTECEDENTES A NIVEL NACIONAL**

La Concesión Sabana de Occidente S.A. presentó un estudio hidrogeológico realizado en la vía Bogotá – Villeta, exactamente en el Km. 31, estudio por medio del cual se puede generar un modelo conceptual matemático con miras en el diseño de obras para el control del deslizamiento presentado. El documento aclaró que a la fecha de presentación del mismo, Marzo de 2013 solo se presentó el modelo hidrogeológico conceptual para el Km. 31. En este estudio se adelantaron actividades relacionadas entre sí, de las cuales las actividades de mayor relevancia para el trabajo son: la parte hidrológica, el análisis de la información hidrogeológica y geológica del área, un reconocimiento geológico, un

inventario de las fuentes de agua subterránea en el área de influencia, se identificaron los tipos de acuíferos existentes, las unidades hidrogeológicas y se definieron las direcciones del flujo subterránea. En una segunda parte se recolecto la información geo-eléctrica a partir de la realización de diez ondeos geo-eléctricos (SEV) y se interpretaron las capas geo-eléctricas en el subsuelo y se relacionan con la geología e hidrogeología del área.

En Diciembre de 2.005, el INGEOMINAS (Instituto Colombiano de Geología y Minería) en compañía del DAGMA (Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente), presentaron el “Estudio de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali”, en el cual se encuentran los estudios de suelos que se realizaron a lo largo de la ciudad de Santiago de Cali, con el fin de conocer el perfil del subsuelo, el comportamiento mecánico de los materiales (suelo, roca, materiales artificiales) y la aplicación de la mecánica de suelos y rocas, lo cual es denominada por Burland (1987) como el triángulo de la mecánica de suelos. En este estudio se lograron agrupar los suelos con base a las exploraciones realizadas, en cuanto a los comportamientos geo-mecánicos similares según sus propiedades índice, de compresibilidad y resistencia, en seis clases de arcillas, cinco tipos de limos, cuatro clases de arenas, cuatro clases de gravas y dos tipos de materia orgánica. De esta manera se plantearon nueve secciones geotécnicas en el sentido de la deposición de los materiales provenientes de las cuencas de la cordillera, con lo que se logró visualizar las siguientes zonas: el piedemonte, el ápice, la parte media y distal de los abanicos, hasta llegar a la llanura de inundación del río Cauca y el sector de Interconexión entre los abanicos y la llanura aluvial.

### **4.3. ANTECEDENTES A NIVEL BOGOTÁ**

El proyecto realizado en la facultad de ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana como trabajo de grado para la maestría en Ingeniería Civil presentado por los Ingenieros Carlos Javier Gonzales Vergara y Edgar Iván Dussan Buitrago, el cual lleva por título “Modelación del flujo en taludes para drenes horizontales”, este proyecto se propone como objetivo general el proponer un criterio de diseño de obras de drenaje, específicamente drenes horizontales, en estabilización de taludes, realizando para el cumplimiento de este objetivo una serie de modelaciones de flujo de agua en taludes sin obras de drenaje y con el empleo de obras de drenaje. Como conclusiones del proyecto en mención se obtuvo que la implementación de drene genero un incremento en el factor de seguridad de los taludes, de igual manera los taludes con menor factor de seguridad en la condición inicial, es decir sin la implementación de drenes, tiene un incremento porcentual mucho mayor en el factor de seguridad, si se comparan con los taludes que en el estado inicial tienen factores de seguridad relativamente altos. El software Slide en algunas condiciones particulares, arroja resultados de la modelación del flujo que difieren de la realidad, cuyos valores no se ajustan a una tendencia.

En la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomas, Julián Andrés Pulecio Díaz, presenta un artículo que lleva como título “Determinación de los parámetros de resistencia al corte en un talud de terraplén, mediante el modelo computacional “Plaxis”, en el cual partiendo de una situación real, se plantea por medio de un modelo numérico, determinar los parámetros de resistencia al corte, para este modelo numérico se plantearon dos situaciones una donde se encuentra el suelo saturado no drenado y el segundo se aplica la condición de sismo sin incluir las condición de tensiones iniciales y la segunda incluyendo las tensiones.

#### **4.4. APORTES AL PRESENTE TRABAJO DE GRADO.**

Los diferentes proyectos aportan al presente trabajo de grado, las diferentes modelaciones que se han realizado en pro del efecto que tienen la inclusión de drenes en cuanto al abatimiento del nivel freático y su directa afectación en el cálculo del factor de seguridad de las estabilidades de taludes.

Los proyectos más importantes para la realización del presente trabajo de grado son: La Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali ya que de este documento se tomaron los datos o parámetros geo mecánicos que se emplearon en las modelaciones que se realizaron en el presente trabajo de grado, delimitando los materiales a arcilla, limo y arena. El segundo proyecto que tiene importancia para la realización del presente trabajo de grado, es la Modelación del Flujo en Taludes con Drenes Horizontales, el cual aportó en la delimitación del análisis de sensibilidad realizado por medio de los parámetros geométricos de los taludes y de los propios drenes, de igual manera se pudo observar las diferentes debilidades del proyecto sobre las cuales se pudo empezar a delimitar el tema del presente trabajo de grado.

## 5. MARCO REFERENCIAL

En el presente marco referencial se exponen todos los conceptos necesarios para la completa comprensión del trabajo de grado que fue desarrollado y cuyos resultados se plasmaron en el presente documento, conceptos como la ubicación geográfica donde se tomaron los datos para las modelaciones realizadas, los conceptos legales que se deben tener en cuenta para la estabilidad de taludes y de igual manera se representan los conceptos teóricos que explican el manejo del software que se utilizó.

### 5.1. MARCO GEOGRÁFICO

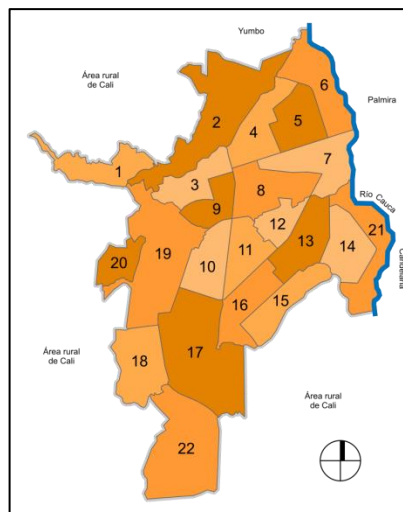
En el presente marco geográfico se presenta la zona donde se realizaron los estudios geotécnicos necesarios para la obtención de los parámetros geo mecánicos que se utilizaron en la realización de las modelaciones correspondientes al presente trabajo de grado, dichos parámetros geo mecánicos se presentan en las tablas 3,4 y 5 del anexo 1.

Los estudios realizados para la obtención de los parámetros geo mecánicos utilizados en el presente trabajo de grado, hicieron parte del estudio del Estudio de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali (Ilustración 1) realizado por el Instituto Colombiano De Geología y Minería INGEOMINAS en colaboración con el Departamento Administrativo de Gestión Del Medio Ambiente DAGMA, presentado en el mes de diciembre del año 2.005.

Santiago de Cali es la capital del departamento del Valle del Cauca, igualmente es la tercera ciudad más poblada de Colombia, tiene un área aproximada de 564 kilómetros cuadrados y hace parte del área metropolitana de Santiago de Cali.

Geográficamente Cali está ubicado en el valle del rio Cauca el cual es el segundo en importancia del país, la zona urbana de Cali se encuentra al costado occidental del rio y a la parte occidental la ciudad se encuentra rodeada por los Farallones de Cali, los cuales se encuentran incluidos en la cordillera occidental delos andes colombianos.

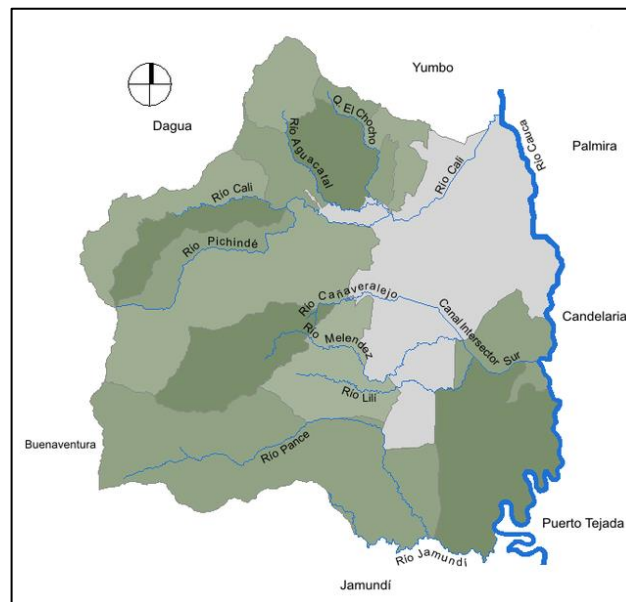
**Ilustración 1 Mapa ciudad de Santiago de Cali.**



Fuente: Alcaldía Santiago de Cali [Citado 22, abril, 2015]. Disponible en [www.cali.gov.co/](http://www.cali.gov.co/).

En cuanto a la hidrografía el municipio de Cali tiene como río principal el río Cauca, el cual en cuanto a la parte correspondiente al municipio inicia desde la desembocadura del río Jamundí hasta el límite del municipio de Cali con el municipio de Yumbo. El río Cauca es de naturaleza sinuosa o meandrica en lo que corresponde al paso por el departamento del Valle (Ver Ilustración 2).

**Ilustración 2 Mapa de los ríos del municipio de Cali.**



Fuente: Alcaldía Santiago de Cali [Citado 22, abril, 2015]. Disponible en [www.cali.gov.co/](http://www.cali.gov.co/).

El clima de la ciudad de Cali es de sabana tropical, la cordillera occidental bloquea el frente de aire húmedo que proviene del océano Pacífico aunque es notable la brisa marina que llega desde el océano Pacífico, en promedio la precipitación anual se encuentra entre los 900 mm en las zonas más secas y 1800 mm en las zonas más lluviosas, con un promedio de 1000 mm sobre la mayor parte del área metropolitana de Cali. La temperatura media se encuentra aproximadamente en 25°C.

## 5.2. MARCO LEGAL

Las amenazas y riesgos han sido objeto de legislación desde tiempos muy antiguos.<sup>3</sup> La legislación se puede considerar como una de las formas más efectivas para la prevención de deslizamientos de tierra por lo cual los códigos de laderas también conocidos como los códigos geotécnicos para la prevención y mitigación de las amenazas y riesgos a los deslizamientos, se han convertido en verdaderas herramientas de prevención de deslizamientos como fue mencionado anteriormente resaltando que en el caso de Colombia el uso de estos códigos se ha extendido a varias partes del país.

En Colombia se puede observar el caso de Bucaramanga donde el código de laderas es manejado por las autoridades ambientales, caso tal de la Corporación para la Defensa de

<sup>3</sup> SUARES, Jaime. Deslizamiento: técnicas de remediación. Bucaramanga, Colombia. Capítulo 12.

la Meseta de Bucaramanga), aunque se debe aclarar que en otros departamentos o municipios estos códigos son manejados por los departamentos de planeación directamente

### **5.2.1. Regulaciones incluidas en los códigos**

Dentro de estos códigos se establecen normas para cubrir los siguientes aspectos importantes:

- Requisitos para la presentación de proyectos que evalúan modificación del terreno.
- Parámetros mínimos para la elaboración de estudios geotécnicos y de estabilidad.
- Aislamientos mínimos de pie y corona de taludes, cauces de quebradas, colectores de alcantarillado, etc.
- Procedimiento para el manejo y estabilización de taludes, tales como muros de contención, control de aguas superficiales y subterráneas.
- Normas para el control de las corrientes de agua.
- Requisitos para la construcción de vías en áreas susceptibles, rellenos en tierra y disposición de escombros.

### **5.2.2. Efectividad de los códigos de Laderas**

Se puede evidenciar que la efectividad de los códigos de ladera en cuanto a la prevención de deslizamientos de tierras, es muy alta ya que estos códigos tiene a sobre diseñar las estructuras con el fin de conseguir factores de seguridad lo más considerables posibles.

### **5.2.3. Escala de los códigos.**

La escala de estos códigos se mide según su población y su extensión geográfica dividiéndose de la siguiente manera: Nacionales, estatales, ciudades o municipios, dependiendo de su escala los objetivos de estos códigos pueden variar al igual que su alcance.

### **5.2.4. Objetivos de los códigos**

Los objetivos de los códigos de laderas pueden variar según la escala sobre la que esté realizando el estudio, ya que cada nación, ciudad o municipio, tiene geologías, condiciones climáticas diferentes por lo cual el código de ladera de una ciudad no puede aplicarse a otra ciudad. Es por esta razón que antes de elaborar cualquier código se debe

tener en cuenta que este debe cubrir un marco legal de prevención de deslizamientos con base a la zona donde se esté trabajando.

### 5.2.5. Aplicación del código y actividades que se regulan.

En cuanto a las áreas de aplicación el código de ladera que se utilizó debe tener claramente identificadas las zonas de aplicación o si por el contrario la aplicación es para cualquier proyecto que se encuentra dentro de la escala de estudio sin importar su ubicación.

Al igual que las áreas de aplicación el código se debe tener claridad sobre las actividades que regulan identificado claramente sobre cuales se puede trabajar.

### 5.2.6. Estudios Mínimos Exigidos

En varias ocasiones los códigos de laderas especifican que tipo de estudios técnicos son requeridos al igual que las características propias. Estos códigos exigen detalles de las investigaciones tales como el número y profundidad de sondeos así como los ensayos geotécnicos realizados.

En la Tabla 1, se muestra una secuencia de entrega de los informes de geología realizadas en la ciudad de San Mateo, California, Estados Unidos.

**Tabla 1 Secuencia de entrega de informes de estudios previos**

| PASO | TITULO DEL INFORME                                       | PROPOSITO  | EXTENSION   |
|------|--|--|---|
| 1    | Informe geológico y de suelos                            | Información geológica y geotécnica requerida                                     | Mapas, caracterización geológica y geotécnica, sondeos y ensayos.                                       |
| 2    | Análisis geotécnico y plan de manejo de los taludes.     | Análisis geotécnico y diseño de obras de manejo y estabilización de los taludes. | Informa detallado de análisis y diseño para revisión y aprobación por parte de la autoridad competente. |
| 3    | Informe "as-built" de las obras de manejo de los taludes | Informe final basado en la inspección de las obras construidas.                  | Levantamiento topográfico de las obras terminadas, ensayos de inspección, resultados de instrumentación |

*Fuente: SUARES, Jaime. Deslizamiento: técnicas de remediación. Bucaramanga, Colombia. Capítulo 12*

Es de resaltar que a nivel de Colombia no se encuentra una normativa o marco legal unificado ya que este es subjetivo a la ubicación del proceso que se esté estudiando y de igual manera a la entidad pública que maneja dicho código de ladera.

### **5.3. MARCO REFERENCIAL TEORICO**

El enfoque teórico empleado para el desarrollo del presente proyecto de grado, está dirigido al tratamiento que se sigue en procesos de estabilización de taludes artificiales donde el principal factor a tener en cuenta es la presión de poros generada por la presencia de agua, también conocido como nivel freático.

#### **5.3.1. Dren**

En este numeral se encuentran los diferentes drenes existentes en la literatura, centrándose específicamente en los drenes horizontales diseñados, los cuales fueron objeto de estudio del trabajo de grado realizado

##### **5.3.1.1. Drenes horizontales**

Los drenes horizontales, conocido también como drenes sub-horizontales, son tubos de diámetro pequeño con ranuras realizadas a lo largo de su longitud, los cuales son instalados con una leve inclinación ascendente en los taludes o terraplenes con el fin de drenar las guas internas.

##### **5.3.1.2. Propósito de los drenes horizontales**

Los drenes horizontales según su propósito se clasifica en dos tipos, aunque para efectos del trabajo de grado realizado solo se utilizaron los drenes diseñados como objeto de modelación.

El primer tipo se conoce como drene prescriptivos, los cuales son utilizados en conjunto con otras medidas de control de deslizamientos como anclajes, muros de contención, entre otras más, se debe aclarar que no se puede cuantificar el efecto de este sobre la estabilidad del talud o el abatimiento del nivel freático y de igual manera este tipo de drenes son utilizadas en varias obras de mitigación realizadas en Colombia.

El segundo tipo, y los cuales fueron objeto de estudio del trabajo de grado, se denominan como drenes diseñados, los cuales si se puede tener un valor numérico del efecto que estos tengan sobre la estabilidad de taludes de igual manera se puede plantear objetivos en cuanto abatimiento del nivel freático con base en sus longitudes e inclinaciones.

##### **5.3.1.3. Diseño del sistema de drenes horizontales**

En este numeral se presentan la principal problemática a la cual el trabajo de grado realizado, tuvo como objetivo darle una solución, basada en las diferentes modelaciones realizadas, ya que existen varios métodos de instalación pero no existe una metodología planteada y confiables para poder revisar y calcular su efecto sobre la estabilidad de taludes y las aguas subterráneas

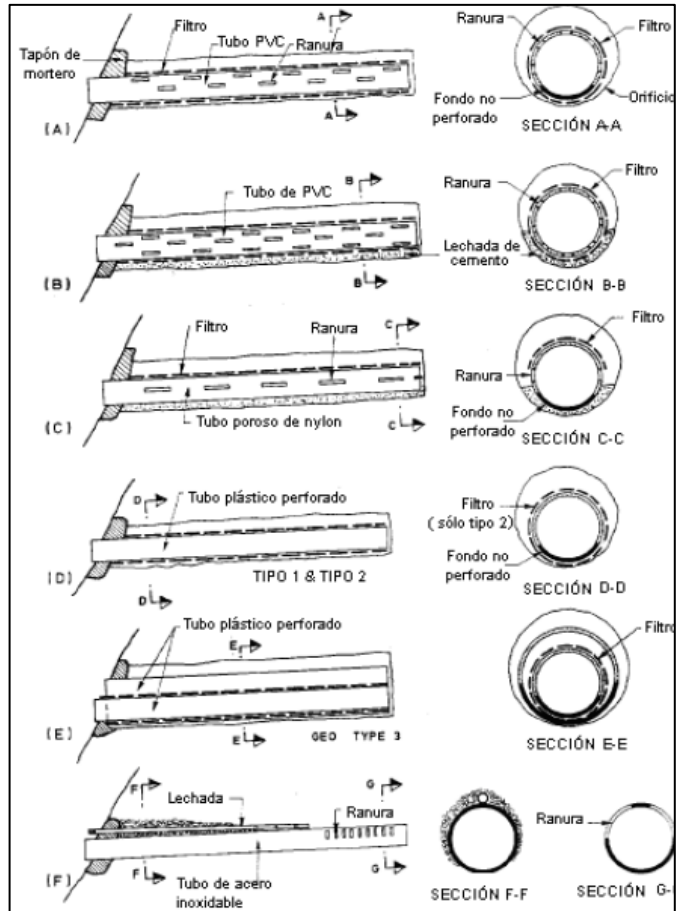
Los drenes horizontales no constituyen una solución universal para los problemas de estabilidad de taludes<sup>4</sup>, se recomienda y en la mayoría de las ocasiones estos drenes son

---

<sup>4</sup> MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA, *Op. Cit.*, p 5-142.

utilizados en conjunto con otras obras de mitigación como los son, anclajes, muros de contención, entre otros. Tipos de drenes horizontales de tuberías.

**Ilustración 3 Algunos tipos de drenes horizontales de tubería**



Fuente: MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA, *Manual de drenaje para carreteras*, Bogotá D.C., Colombia, Consorcio ALFA, 2009, p 5-141.

En la Ilustración 3 se muestran algunos tipos de drenes horizontales, y de los cuales se puede resaltar que según las consideraciones expuestas en el artículo 674 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del INVIAS el dren que más se ajusta es el de clase D.

“La diferencia entre los tipos 1 y 2 de la clase D (Ver Ilustración 3), es que el primero consiste solo en una tubería de PVC perforada, con fondo impermeable, insertada en un orificio auto soportable, mientras en el segundo la tubería esta forrada con un geo textil no tejido, cuya finalidad es impedir la acumulación de sedimentos en las perforaciones de la tubería.”<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Ibid., p 5-140

#### 5.3.1.4. Drenes diseñados

Para poder entender el tema de los drenes diseñados, se debe tener en cuenta que a partir de que dichos drenes empezaron a ser utilizados por diversos investigadores, han ido proponiendo diferentes procesos cuantitativos y cualitativos en cuanto al diseño de drenes convencionales y geo drenes de penetración. “Ellos abarcan desde soluciones técnicas de tipo matemático hasta cartas de diseño basadas en experimentos de laboratorio.”<sup>6</sup>

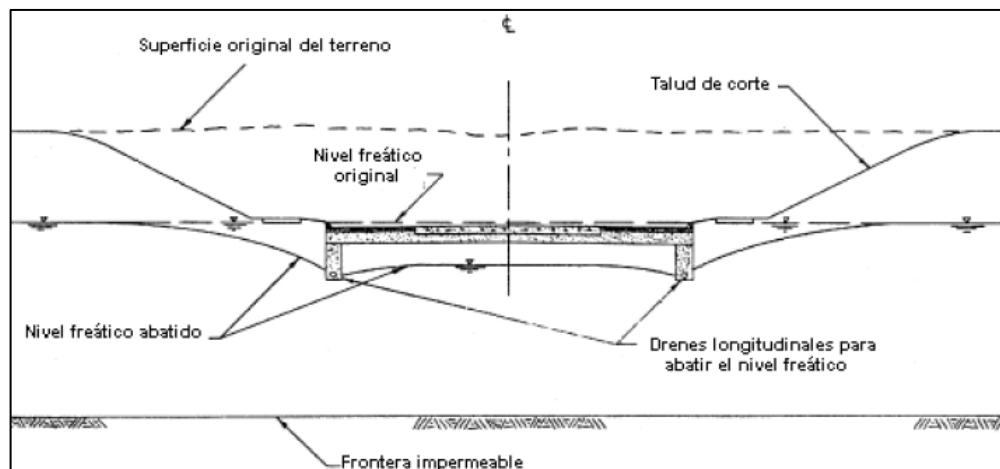
#### 5.3.1.5. Control del agua subterránea

“Parte fundamental de cualquier sistema efectivo de drenaje sub-superficial de una carretera consiste en mantener el agua subterránea alejada de su plataforma.”<sup>7</sup>

El diseño de sistemas de drenajes en Colombia ha sido durante años basado en criterios elementales y solo ocasionalmente se utilizan técnicas gráficas que se apoyan en la utilización de redes de flujo como se explicara posteriormente en el presente documento.

Métodos de control de los niveles freáticos tales como los drenes interceptores longitudinales o los drenes simétricos, se basan fundamentalmente en la teoría de la filtración, aunque se tiene que tener en cuenta que no se han podido eliminar del todo elementos empíricos en su diseño (Ver Ilustración 4).

**Ilustración 4 Drenes longitudinales simétricos para abatir el nivel freático.**



Fuente: MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA, *Manual de drenaje para carreteras*, Bogotá D.C., Colombia, Consorcio ALFA, 2009, p 5-110.

También se tiene en cuenta obras de control de agua interna, aunque se debe recalcar en el hecho de que no existe suficiente y consensuada literatura disponible sobre el tema, por lo cual estas obras de manejo se diseñan basadas en la ley de Darcy o el propio uso de las redes de flujo.

<sup>6</sup> Ibid, p 5-146

<sup>7</sup> Ibid., p 5-109

### 5.3.2. Estabilidad de taludes

*“La estabilidad de taludes es la teoría que estudia la estabilidad o posible inestabilidad de un talud a la hora de realizar un proyecto, o llevar a cabo una obra de construcción de ingeniería, siendo un aspecto directamente relacionado con la ingeniería geotécnica. La inestabilidad de un talud, se puede producir por un desnivel, que tiene lugar por diversas razones:*

*Razones geológicas: laderas posiblemente inestables, orografía acusada, estratificación, meteorización, etc.*

*Variación del nivel freático: situaciones estacionales, u obras realizadas por el hombre.*

*Obras de ingeniería: rellenos o excavaciones tanto de obra civil, como de minería”<sup>8</sup>.*

#### 5.3.2.1. Caracterización de los movimientos.

“Los deslizamientos son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daños en las propiedades por valor de decenas de billones de dólares cada año.”<sup>9</sup>

Aun así se debe tener que si se tuviera un debido conocimiento de la importancia de estos eventos se podría evitar alrededor del 90% de las pérdidas ocasionadas por los mismos.

Existen diversos factores que son detonantes de deslizamientos dentro de los cuales se pueden enumerar, la topografía, la sismicidad, la meteorización y las lluvias intensas.

#### 5.3.2.2. Nomenclatura de un talud o ladera

Un talud es definido como una masa de tierra que posee una pendiente sin este ser necesariamente plana, de igual manera posee grandes cambios de alturas. Luego de una revisión a la literatura técnica existente se define ladera cuando esta es generada por un proceso natural, y por otro lado se define talud cuando estos son conformados de manera artificial.

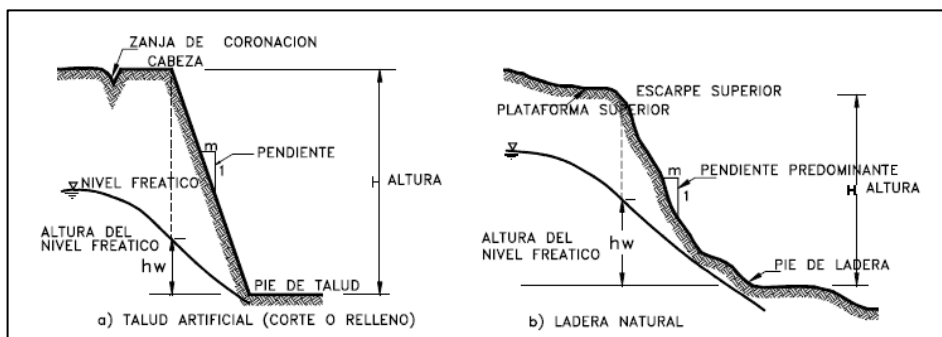
A continuación se presentan la distinta nomenclatura que se presenta tanto en un talud como en una ladera, los cuales son importantes en su estudio y estabilización.

---

<sup>8</sup> HUACHO RAMOS, Miguel. Factores que influyen en la estabilidad de taludes. [Citado 29, Abril, 2015]. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/190822254/Factores-Que-Influyen-en-La-Estabilidad-de-Taludes#scribd>.

<sup>9</sup> SUARES DIAZ, Jaime, Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales, Bucaramanga, Colombia, 1998, p.1.

**Ilustración 5 Nomenclatura de taludes y laderas**



Fuente: SUARES DIAZ, Jaime, *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*, Bucaramanga, Colombia, 1998, p.2

Se deben tener en cuenta que laderas que han permanecido estables por muchos años pueden fallar de forma imprevista, debido a factores tales como la sismicidad, la topografía, los flujos de agua existentes, cambios en la resistencia del talud y meteorización del suelo.

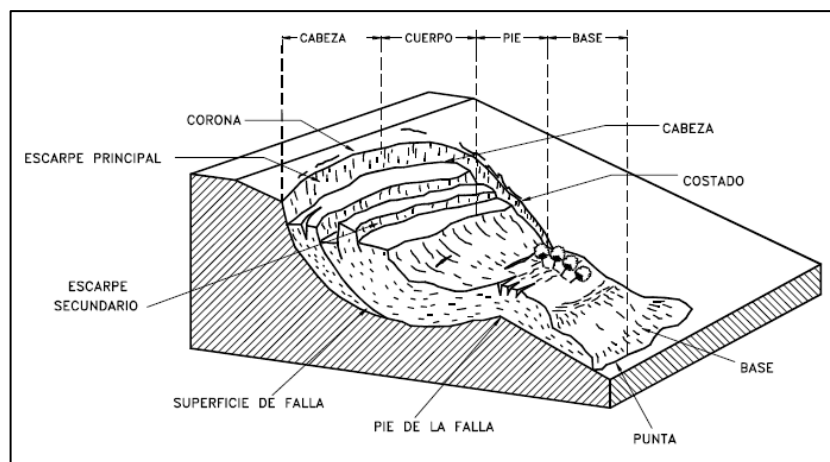
Mirando el lado de los taludes, estos se pueden agrupar en tres categorías como lo son los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención.

### 5.3.2.3. Nomenclatura de los procesos de movimiento.

Por lo general los diversos movimientos hacia abajo y hacia afuera de los materiales que conforman un talud de roca, suelo natural o relleno o bien sea una combinación de ellos corresponden principalmente a un proceso geotécnico el cual sucede sobre una superficie de falla, y se generan por caída libre, movimientos de masa, erosión o flujos.

En la Ilustración 6 se muestran los distintos elementos que constituyen un proceso de movimiento.

**Ilustración 6 Nomenclatura de un deslizamiento**



Fuente: SUARES DIAZ, Jaime, *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*, Bucaramanga, Colombia, 1998, p.3

#### 5.3.2.4. Esfuerzo y resistencia al cortante

Las teorías de resistencia de materiales son utilizadas con gran éxito en las distintas modelaciones matemáticas que se emplean para la representación de un fenómeno de falla.

Según la ecuación generalizada de Coulomb los suelos o rocas al fallar se comportan de acuerdo con las teorías de fricción y cohesión como se representa matemáticamente a continuación:

Para suelos saturados:

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan \varphi' \quad \text{Ecuación 1}$$

Para suelos parcialmente saturados:

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan \varphi' + (\mu - \mu_a) \tan \varphi'' \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

$\tau$  = Esfuerzo de resistencia al corte

$c'$  = Cohesion o cementacion efectiva

$\sigma$  = Esfuerzo normal total

$\mu$  = Presion del agua intersticial o de poros

$\mu_a$  = Presion del aire intersticial

$\varphi'$  = Angulo de friccion interna del material

$\varphi''$  = Angulo de friccion del material no saturado

“El análisis de la ecuación de Coulomb requiere predefinir los parámetros, ángulo de fricción y cohesión, los cuales se consideran como propiedades intrínsecas del suelo.”.

Se debe tener en cuenta que la presencia de agua en el suelo influye directamente en la reducción del valor de resistencia de la masa en estudio, dependiendo de igual manera de la presión de poros interna, la cual es conocida como  $u$  dentro de la ecuación de

Coulomb, en la cual el factor  $u$  está restando a la valor de la presión normal, de lo cual resulta como la presión efectiva  $\sigma'$ .

$$\sigma' = \sigma - \mu$$

Ecuación 3

Dónde:

$\mu =$  Presion del agua intersticial o de poros

$\sigma' =$  Presion efectiva

### 5.3.2.5. Modelos de análisis de estabilidad

En la práctica común de la ingeniería la estabilidad de un talud está dada en términos de un factor de seguridad, el cual es resultado de un análisis matemático de estabilidad, El modelo matemático que se utiliza para el cálculo del factor de seguridad debe tener en cuenta la mayor cantidad de factores que afectan la estabilidad, tales como los parámetros físico, geo mecánicos, geológicos, sísmicos, presencia de agua y propiedades del mismo suelo.

Las superficies de falla que se pueden estudiar son planas, circulares, logarítmicas, parabólicas y combinaciones de ellas. Sin embargo se emplean aproximaciones o en su defecto las superficies de falla circulares en la mayoría de los trabajos existentes.

### 5.3.2.6. Condiciones drenadas o no drenadas

“Si la inestabilidad es causada por cambios en la carga, tal como la remoción de materiales de la parte baja del talud o aumento de las cargas en la parte superior, en suelos de baja permeabilidad, estos pueden no tener tiempo suficiente para drenar durante el tiempo en el cual ocurre el cambio de carga”.<sup>10</sup>

Se debe tener en cuenta que los suelos tienen la capacidad permeable suficiente para disipar los excesos de presión de poros y por lo cual se comportan en condiciones drenadas.

Cuando se hablan de permeabilidades de suelos drenados se expresan valores del orden de  $10^{-4}$  cm/seg, y por otro lado cuando se habla de suelos no drenados se consideran valores del orden de  $10^{-7}$  cm/seg., y de igual manera los suelos que se encuentran con valores en la mitad de los dos mencionados se consideran parcialmente drenadas.

Duncan en 1996 propone la siguiente ecuación para determinar las condiciones de drenaje:

---

<sup>10</sup> *Ibíd.*, p 117.

$$vT = \frac{C_v t}{D^2}$$

Ecuación 4

Dónde:

*T = Factor adimensional*

*C<sub>v</sub> = Coeficiente de consolidación*

*t = Tiempo de drenaje*

*D = Longitud del camino de drenaje o distancia de salida del agua al cambio de presiones.*

Los siguientes son los resultados y la respectiva interpretación en cuanto a la condición de drenajes del suelo.

T > 3 (Condición drenada)

T < 0.01 (Condición no drenada)

0.01 > T < 3.0 (Drenaje parcial)

### **5.3.2.7. Equilibrio límite y factor de seguridad**

“El análisis de los movimientos de los taludes o laderas durante muchos años se ha realizado utilizando técnicas de equilibrio límite.”<sup>11</sup> Cabe mencionar que dentro de estos análisis no se requiere tener información sobre la relación esfuerzo deformación pero si se requiere conocer la resistencia del suelo que se está estudiando.

El sistema de equilibrio límite supone un factor de seguridad en falla de 1.0 ya que las fuerzas actuantes deben ser iguales a las fuerzas resistentes.

A continuación se presentan los diferentes métodos de análisis de estabilidad de taludes.

---

<sup>11</sup> *Ibíd.*, p 121.

**Tabla 2 Métodos de análisis de estabilizada de taludes**

| METODO                            | SUPERFICIE DE FALLA                    | EQUILIBRIO                        | CARACTERISITICAS   |
|-----------------------------------|--|-----------------------------------|--|
| Bishop simplificado (Bishop 1955) | Circulares                             | De momentos                       | Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobre determinada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.  |
| Janbu simplificado (Janbu 1968)   | Cualquier forma de superficie de falla | De fuerzas                        | Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobre determinada que no Satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección $F_0$ para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos. |
| Spencer (1967)                    | Cualquier forma de superficie de falla | Momentos y fuerzas                | Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.   |
| Elementos finitos                 | Cualquier forma de superficie de falla | Analiza esfuerzos y deformaciones | Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos, pero no se obtiene un factor de seguridad.   |

*SUARES DIAZ, Jaime, Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales, Bucaramanga, Colombia, 1998, p.122.*

### 5.3.3. Ecuaciones que rigen el flujo en un suelo

Para el análisis realizado por medio del software Slide en cuanto al comportamiento del flujo en suelo, son aplicables las ecuaciones que se refieren en este numeral. ,

#### 5.3.3.1. Ley de Darcy

Para comprender la ley de Darcy en su totalidad se “Establece que el caudal  $Q$  que es capaz de atravesar un medio permeable, es proporcional al área de paso del medio permeable  $A$ , normal al flujo, y al gradiente de niveles piezométricos entre la entrada y la salida del flujo en el medio permeable,  $i$ .”<sup>12</sup>

La permeabilidad del medio donde están incluidas las características propias del fluido es la constante de proporcionalidad (Ecuación 5).

$$Q = -kAi \quad \text{Ecuación 5}$$

Siendo:

$Q$  = Caudal de paso ( $L^3 T^{-1}$ )  
 $k$  = Permeabilidad de Darcy ( $LT^{-1}$ )  
 $A$  = Área de paso ( $L^2$ )  
 $i$  = Gradiente piezométrico.

“El gradiente de un escalar es un vector, definido por su módulo, dirección y sentido. El módulo es la derivada direccional de la función escalar: la dirección es la normal a las curvas de nivel de la función escalar; el sentido es el del aumento en el valor de la función.”<sup>13</sup>

Al existir movimiento de un flujo entre zonas de mayor nivel piezométrico a zonas de bajo nivel piezométrico, el flujo y el gradiente tiene direcciones distintas, lo cual es justificación clara para el signo negativo incluido en el segundo término de la ecuación de Darcy.

La ecuación de Darcy se puede expresar de manera diferencial teniendo en cuenta los niveles piezométricos a lo largo del recorrido del flujo por medio poroso teniendo en cuenta de igual manera al nivel piezométrico ( $h$ ) y al espacio en el sentido del flujo ( $x$ ) (Ecuación 6).

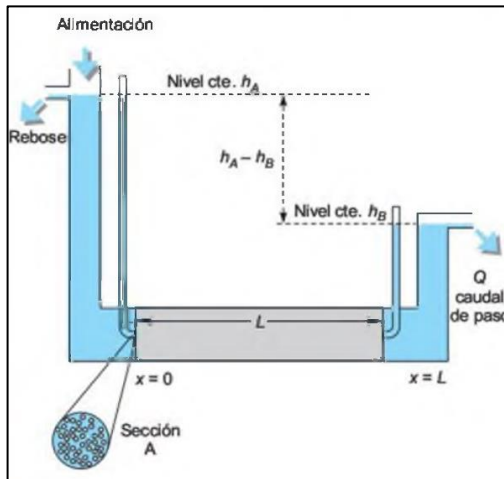
$$Q = -kA \frac{dh}{dx} \quad \text{Ecuación 6}$$

---

<sup>12</sup> GONZALES DE VALLEJO, Luis, FERRER Mercedes, ORTUÑO Luis, OTEO Carlos, Ingeniería Geológica, Madrid, España, 2004, p. p 274.

<sup>13</sup> Ibid. p 275.

**Ilustración 7 Gráfico Ley de Darcy**



Fuente: Fuente: GONZALES DE VALLEJO, Luis, FERRER Mercedes, ORTUÑO Luis, OTEO Carlos, Ingeniería Geológica, Madrid, España, 2004, p.275.

En el experimento que se presenta en la Ilustración 7, se mantienen los niveles  $h_A$  y  $h_B$ , y de igual manera se mantienen constantes  $k$  y  $A$  para todo el medio permeable, la ecuación de Darcy (Ecuación 7) se presenta de una manera más sencilla.

$$Q = kA \frac{h_A - h_B}{L} \quad \text{Ecuación 7}$$

Se debe tener en cuenta que la ley de Darcy es válida únicamente para el caso en el régimen sea laminar. La evaluación del régimen para denominarlo como laminar o no laminar se realiza apoyado en el denominado número de Reynolds, el cual representa la relación entre las fuerzas de inercia y viscosas en el seno de un fluido.

$$R_e = \frac{\rho v d}{\mu} \quad \text{Ecuación 8}$$

Dónde:

$v$  : Velocidad del fluido

$d$  : Tamaño de las partículas; se considera el  $d_{30}$  en medios granulares y  $2e$  en medios fisurados, siendo  $e$  el ancho medio de las fisuras.

$\rho$  : Densidad del fluido.

$\mu$  : Viscosidad dinámica.

Se tiene en cuenta que el número de Reynolds es adimensional (Ecuación 9)

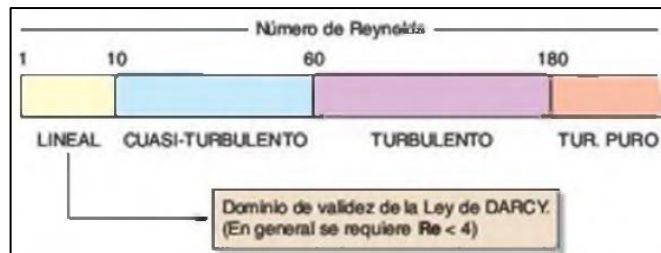
$$[R_e] = \frac{(ML^{-3})(L)}{(MLT^{-2})(T)(L^{-2})}$$

Ecuación 9

“De cualquier modo, para su cálculo se deben utilizar unidades homogéneas: por ejemplo,  $v$  en cm/s,  $d$  en cm,  $\rho$  en g/cm<sup>3</sup> y  $\mu$  en dina – seg/cm<sup>2</sup>.”<sup>14</sup>

En la Ilustración 8 se muestran los distintos régimen de flujo que se tiene según el número de Reynolds que se calcule, teniendo en cuenta que para la validez de la ley de Darcy ( $Re < 4$ ).

Ilustración 8 Régimen de flujo



Fuente: GONZALES DE VALLEJO, Luis, FERRER Mercedes, ORTUÑO Luis, OTEO Carlos, Ingeniería Geológica, Madrid, España, 2004, p. 275.

La permeabilidad ( $k$ ) es dependiente tanto de las características del medio como de los fluidos, es decir, se refiere a la conductividad hidráulica, que también suele ser denominada como permeabilidad de Darcy.

$$Q = -kA \frac{dh}{dx}$$

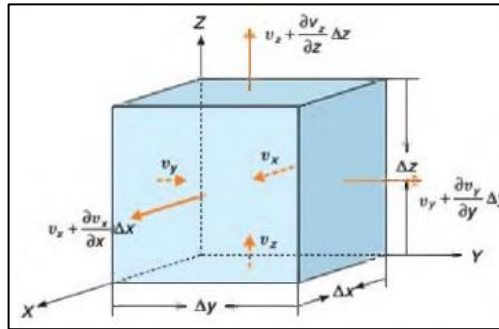
Ecuación 10

### 5.3.3.2. Ecuación de la continuidad para flujo estacionario.

El concepto de flujo estacionario implica que el agua entra en un recinto acotado sea igual a la que va a salir del mismo sin que varíe al agua almacenada en dicho recinto y que, por tanto, no existan variaciones del nivel piezométrico.

<sup>14</sup> Ibid., p 275.

**Ilustración 9 Balance de agua en un cubo poroso elemental**



Fuente: GONZALES DE VALLEJO, Luis, FERRER Mercedes, ORTUÑO Luis, OTEO Carlos, Ingeniería Geológica, Madrid, España, 2004, p.278.

La Ilustración 9 muestra un volumen elemental representativo (VER), se representa en forma de cubo y posee las mismas propiedades del medio, se tiene en cuenta que los caudales que entran por una cara serán los mismos que salen por las otras caras, de igual forma la suma de los caudales entrantes tiene que ser igual a la suma de los caudales salientes.

Las dimensiones del cubo elemental se reconocen como  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ , y el volumen está dado por  $\Delta V = \Delta x * \Delta y * \Delta z$ . En cada una de las caras del cubo entrara un caudal  $Q$  que se identificara como un caudal unitario por unidad de área. Se considera que si por una cara entra un flujo unitario  $v$  por la cara opuesta saldrá  $v + \Delta v$ .

Según el desarrollo de Taylor, la función incrementada es igual a la función sin incrementar más la derivada de la función por el incremento y una serie de términos, que son infinitésimos de orden superior, despreciables según las circunstancias.

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \frac{\Delta x^2}{2!} + \frac{\partial^2 f}{\partial x^3} \frac{\Delta x^3}{3!} + \dots \quad \text{Ecuación 11}$$

Lo cual se aproxima a la Ecuación 12.

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x \quad \text{Ecuación 12}$$

Teniendo en cuenta el desarrollo de una serie de Taylor se realiza el balance del agua dentro del cubo elemental, despreciando infinitésimos de orden superior al primero y sumando los componentes del caudal unitario (flujo) en cada dirección, teniendo en cuenta eso el balance entre las caras del VER se representa de la siguiente manera de acuerdo de a la Ecuación 13, Ecuación 14 y Ecuación 15.

$$\text{Cara } yz: \left( v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} \Delta x - v_x \right) \Delta y \Delta z \rightarrow \frac{\partial v_x}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\text{Cara } xz: \left( v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} \Delta y - v_y \right) \Delta x \Delta z \rightarrow \frac{\partial v_y}{\partial y} \Delta y \Delta x \Delta z \quad \text{Ecuación 14}$$

$$\text{Cara } xy: \left( v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} \Delta z - v_z \right) \Delta x \Delta y \rightarrow \frac{\partial v_z}{\partial z} \Delta z \Delta x \Delta y \quad \text{Ecuación 15}$$

Con el fin de respetar la condición de más entrante igual a masa saliente, las tres cantidades que representan el flujo tienen que ser nulas por lo cual la ecuación de flujo sería igual a la Ecuación 16:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z + \frac{\partial v_y}{\partial y} \Delta y \Delta x \Delta z + \frac{\partial v_z}{\partial z} \Delta z \Delta x \Delta y = 0 \quad \text{Ecuación 16}$$

De igual manera teniendo en cuenta que  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1$  la ecuación queda reducida de la siguiente manera (Ver Ecuación 17), la cual a su vez es la ecuación de la continuidad en flujo estacionario.

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad \text{Ecuación 17}$$

### 5.3.3.3. Ecuación de Laplace

“La ecuación de Laplace es la primera de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que gobiernan el flujo en medios porosos (permeables en general, cuando el medio pueda ser asumido como poroso).”<sup>15</sup>

La aplicación conjunta de las ecuaciones de continuidad (Ecuación 17) y la ley de Darcy (Ecuación 18), y dentro de la cual se tiene en cuenta que se debe aceptar inicialmente

<sup>15</sup> Ibid., p 277.

que el flujo entrante en el medio poroso debe ser igual al flujo saliente del mismo medio, y que a su vez están condicionados por los planteamientos de Darcy.

$$v_x = -k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} ; v_y = -k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} ; v_z = -k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad \text{Ecuación 18}$$

Lo cual luego de desarrollarlas conjuntamente se obtiene la Ecuación 19:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( -k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( -k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( -k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad \text{Ecuación 19}$$

Considerando que el medio es homogéneo (la permeabilidad es la misma en cualquier punto del espacio) e isótropo (la permeabilidad es la misma en cualquier dirección del espacio) si tiene la Ecuación 20 y Ecuación 21:

$$k_{xx} = k_{yy} = k_{zz} = k \quad \text{Ecuación 20}$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad \text{Ecuación 21}$$

La Ecuación 21 es conocida como la ecuación de Laplace es cual identifica el régimen permanente homogéneo e isótropo, y con ausencia de fuentes y sumideros).

Existen dos características que describen las características del entorno del medio, las cuales son:

Condiciones Dirichlet: Nivel piezómetro conocido en frontera.

Condiciones Neuman: Flujo conocido en frontera.

#### 5.3.3.4. Ecuación del flujo en régimen transitorio

“En el régimen permanente se obtienen soluciones de equilibrio para un fenómeno concreto. No se trata de cómo ni cuándo se alcanza ese equilibrio, únicamente se calcula la solución del equilibrio.”<sup>16</sup>

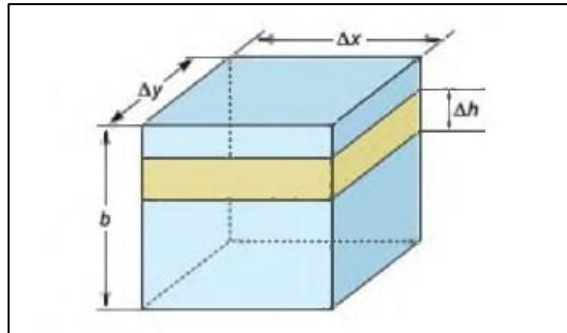
---

<sup>16</sup> *Ibíd.*, p 278.

Para cambiar el equilibrio de un sistema se requieren acciones como bombeo o recarga, provocando que el sistema evoluciones hasta que nuevamente recupere el equilibrio. Los niveles del sistema van variando y en consecuencia se va almacenando o des almacenando en el recinto. Por esto la ecuación de la continuidad, en el régimen transitorio se aplica de la siguiente manera.

$$\text{Volumen saliente} = \text{Volumen entrante} - \text{Volumen desalmacenado (en un } \Delta t)$$

**Ilustración 10 Esquema: deducción de la ecuación general del flujo transitorio**



Fuente: GONZALES DE VALLEJO, Luis, FERRER Mercedes, ORTUÑO Luis, OTEO Carlos, Ingeniería Geológica, Madrid, España, 2004, p.279.

Como se muestra en la Ilustración 10, el nivel varia  $\Delta h$  en un intervalo de tiempo  $\Delta t$ . El volumen de roca vaciado vendrá dado por  $\Delta h \cdot \Delta x \cdot \Delta y$ , y el volumen de agua contenido en este volumen de roca vendra dado por  $S \cdot \Delta h \cdot \Delta x \cdot \Delta y / \Delta t$ .

Introduciendo el término del volumen de roca en la ecuación de la continuidad se tiene en cuenta la presencia de fuentes y sumideros se obtiene la Ecuación 22:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} \Delta x (b \Delta y) + \frac{\partial v_y}{\partial y} \Delta y (b \Delta x) = \text{Ecuación 22}$$

$$= R(x, y, t) \Delta x \Delta y - S \frac{\partial h}{\partial t} (\Delta x \Delta y)$$

Aplicando la ley de Darcy generalizado como en anteriores ecuaciones, se obtiene la Ecuación 23, Ecuación 24 y Ecuación 25:

$$v_x = -k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \text{Ecuación 23}$$

$$v_y = -k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}$$

Ecuación 24

$$v_z = -k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

Ecuación 25

Una vez más asumiendo que el medio sobre el que se está trabajando se encuentra homogéneo e isótropo ( $k_{xx} = k_{yy} = k_{zz} = k$ ), discretización cuadrada ( $\Delta x = \Delta y$ ) y  $T = kb$  se obtiene la Ecuación 26:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{R(x, y, t)}{T}$$

Ecuación 26

La anterior es la ecuación general del flujo en régimen transitorio, presencia de fuentes y sumideros y permeabilidad homogénea e isótropa, dentro de los cuales los siguientes son los términos:

$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}$  : Suma de caudales entrantes por las caras laterales.

$\frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$  : Volúmenes des-almacenados en la unidad de tiempo.

$\frac{R(x, y, t)}{T}$  : Bombeos o recargas en la unidad de tiempo.

### 5.3.3.5. Red de flujo

Una red de flujo es la representación gráfica del flujo que existe a través de un suelo o una roca, la cual es representada por medio de dos familias de curvas, una se denomina "líneas de flujo" y la otra se denomina "líneas equipotenciales".

### 5.3.3.6. Líneas de flujo

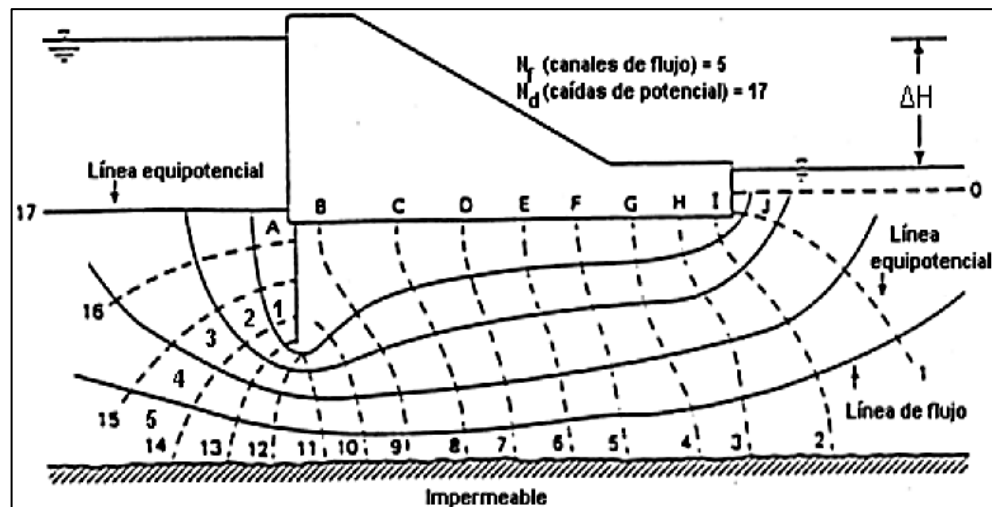
La ruta que siguen las partículas de agua a través del continuo, suelos o rocas en desarrollo del flujo; son conocidas como líneas de flujo. El flujo de agua se presenta de un punto de alto potencial a uno de menor potencial, haciendo curvas suaves cuando la dirección del flujo cambia. Entonces se puede dibujar una serie de curvas suaves representativas de las rutas seguidas de las partículas del agua en movimiento.

### 5.3.3.7. Líneas equipotenciales

Como el agua se mueve en la misma dirección de las líneas de flujo, esta experimenta una continua pérdida de su potencial. Si se tiene que la función potencial, es la que genera el flujo, en diferentes puntos a lo largo de la línea de flujo se tiene diferente potencial, entonces al unir los puntos de igual potencial, se obtiene un segundo grupo de líneas conocida como líneas equipotenciales. Estas líneas son perpendiculares a las líneas de flujo.

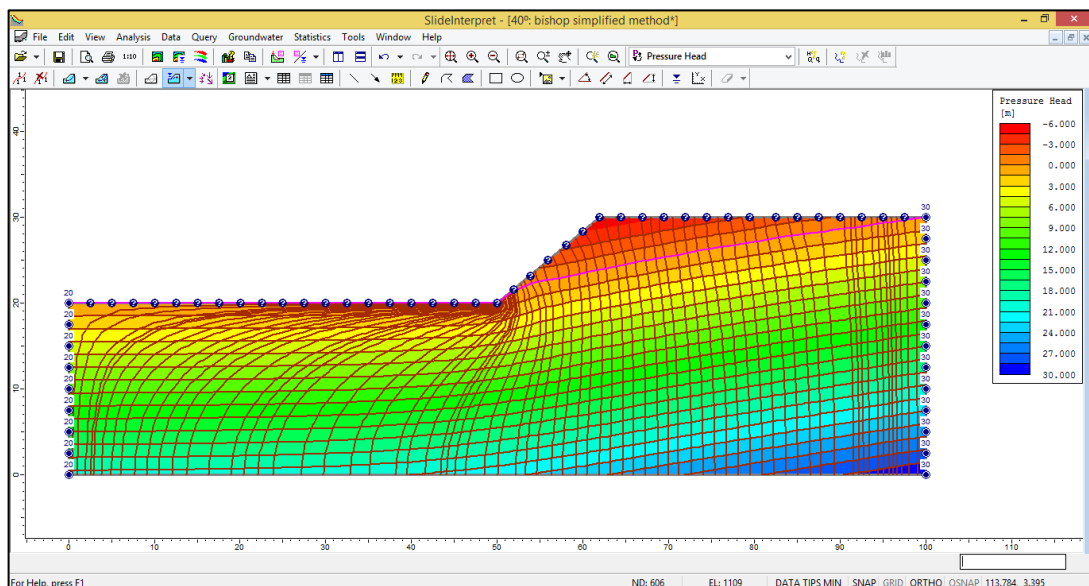
A continuación en la Ilustración 11 se muestra un ejemplo de la red de flujo en un talud obtenida de la modelación realizada en slide.

Ilustración 11 Ejemplo de una red de flujo



Fuente: MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA, *Manual de drenaje para carreteras*, Bogotá D.C., Colombia, Consorcio ALFA, 2009, p 5-111.

**Ilustración 12 Esquema de una red de flujo mediante software Slide**



*Fuente: Propia*

#### **5.3.4. Clasificación de suelos.**

Establecer un lenguaje común y relacionar propiedades con determinados grupos de suelos. Se considera el suelo como material. Los principales sistemas de clasificación son:

- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos USCS
- American Association of State Highway Officials AASTHO

##### **5.3.4.1. Arena**

Partículas de roca que pasa un tamiz de 4.75 mm (No. 4) y quedan retenida sobre un tamiz de 0.075 mm (No. 200) con las subdivisiones siguientes:

- Gruesa: Pasa tamiz de 4.75 mm (No. 4) y queda retenida sobre tamiz de 2.00 mm (No. 10)
- Media: Pasa tamiz 2.00 mm (No. 10) y queda retenida sobre el tamiz de 0.0425 mm (No. 40)
- Fina: Pasa tamiz de 0.0425 mm (No. 40) y queda retenido sobre tamiz de 0.075 mm (No. 200).

#### **5.3.4.2. Limo**

Suelo que pasa tamiz de 0.075 mm (No. 200), ligeramente plástico o no plástico y que exhibe poca o ninguna resistencia cuando se seca al aire. Para clasificación, un limo es un suelo de grano fino, o la porción fina de un suelo con índice plástico menor que 4, para el cual la coordenada que representa el índice plástico contra el límite líquido cae por debajo de la línea "A", en la carta de plasticidad.

#### **5.3.4.3. Arcilla**

Suelo que pasa tamiz de 0.075 mm (No. 200); el cual puede mostrar la plasticidad (consistencia como de masilla) dentro de un cierto intervalo de humedad, pero que muestra considerable resistencia cuando se seca al aire.

Para su clasificación, una arcilla es un suelo de grano fino, o la porción fina de un suelo con un índice de plasticidad igual o mayor que 4, para el cual la coordenada que representa el índice plástico contra el límite líquido en la carta de plasticidad cae por encima de la línea "A".

#### **5.3.4.4. Distribución granulométrica**

Las propiedades geotécnicas del suelo, tales como la granulometría, la plasticidad, la compresibilidad y la resistencia al cortante, pueden determinarse mediante pruebas apropiadas de laboratorio.<sup>17</sup>

Para efectos del presente trabajo de grado se emplean materiales como arenas, limos y arcillas, de los cuales se tiene las diferentes propiedades físicas y mecánicas.

Los suelos se encuentran conformados por una distribución variable de tamaños en su granulometría es por esto que se debe tener principal cuidado en la manera de conocer la distribución granulométrica de cada uno, los dos criterios que se deben tener en cuenta para este tipo de evaluación son si la masa de suelo es de grano grueso (Conformado principalmente por gravas y arenas) la distribución granulométrica se realizara por medio de tamizado, y si por el contrario la masa de suelo tiene grano fino este análisis granulométrico se realizara por medio de hidrómetro.

El análisis granulométrico realizado por una serie de tamices normalizada, se efectúa tomando una muestra de masa de suelo bien pulverizado y seco, el cual es pasado por medio de una columna de tamices de distintas aberturas ubicados de manera descendente tomando los apilables para la ejecución del ensayo, en la Tabla 3 se muestra variaciones permisibles para tejido de alambre de tamices de ensayo estándar.

---

<sup>17</sup> BRAJA M. Das, Principios de Cimentación, Edición 5, México D.F., Cengage Learning™, 2008, p1.

Tabla 3 Dimensiones nominales. Serie Estándar (EEUU)

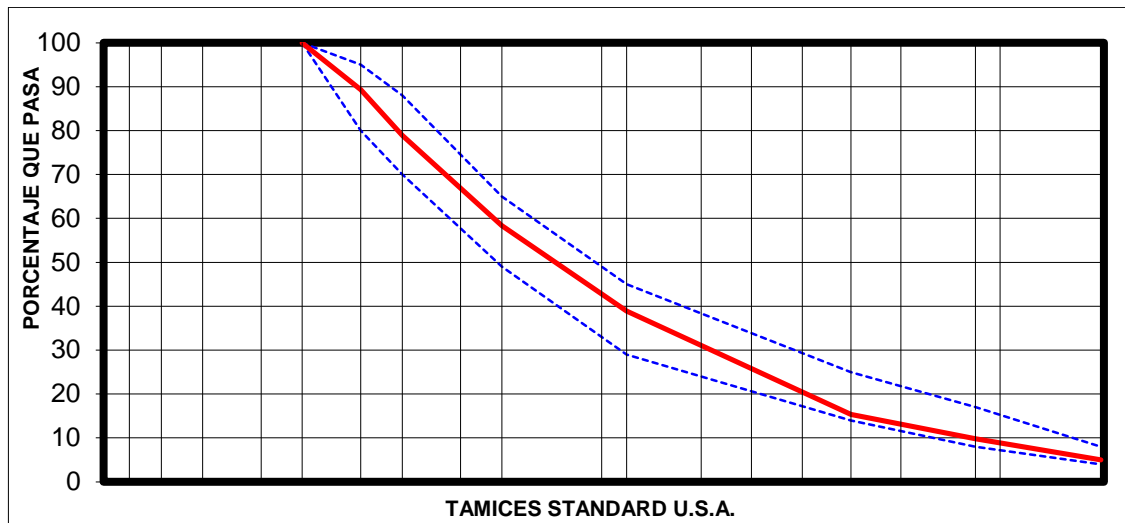
| Designación del tamiz |                             | Abertura de tamiz nominal, pulgadas <sup>A</sup> | Variación permisible de abertura promedio a partir de la designación de tamiz estándar | Dimensión de abertura excedida por máximo el 5% de las aberturas | Abertura máxima individual | Diámetro nominal del alambre, mm <sup>B</sup> |
|-----------------------|-----------------------------|--|--|--|----------------------------|---|
| Estándar <sup>C</sup> | Alternativa                 |  |  |  |                            |   |
| (1)                   | (2)                         | (3)  | (4)  | (5)  | (6)                        | (7)   |
| 125 mm                | 5 pulgadas                  | 5  | ± 3,70 mm  | 130,0 mm   | 130,9 mm                   | 8,00  |
| 106 mm                | 4,24 pulgadas               | 4,24   | ± 3,20 mm  | 110,1 mm   | 111,0 mm                   | 6,30  |
| 100 mm <sup>D</sup>   | 4 pulgadas <sup>D</sup>     | 4  | ± 3,00 mm  | 104,0 mm   | 104,8 mm                   | 6,30  |
| 90 mm                 | 3 1/2 de pulgada            | 3,5  | ± 2,70 mm  | 93,6 mm  | 94,4 mm                    | 6,30  |
| 75 mm                 | 3 pulgadas                  | 3  | ± 2,20 mm  | 78,1 mm  | 78,7 mm                    | 6,30  |
| 63 mm                 | 2 1/2 de pulgada            | 2,5  | ± 1,90 mm  | 65,6 mm  | 66,2 mm                    | 5,60  |
| 53 mm                 | 2,12 pulgadas               | 2,12   | ± 1,60 mm  | 55,2 mm  | 55,7 mm                    | 5,00  |
| 50 mm <sup>D</sup>    | 2 pulgadas <sup>D</sup>     | 2  | ± 1,50 mm  | 52,1 mm  | 52,6 mm                    | 5,00  |
| 45 mm                 | 1 3/4 de pulgada            | 1,75   | ± 1,40 mm  | 46,9 mm  | 47,4 mm                    | 4,50  |
| 37,5 mm               | 1 1/2 de pulgada            | 1,5  | ± 1,10 mm  | 39,1 mm  | 39,5 mm                    | 4,50  |
| 31,5 mm               | 1 1/4 de pulgada            | 1,25   | ± 1,00 mm  | 32,9 mm  | 33,2 mm                    | 4,00  |
| 26,5 mm               | 1,06 pulgadas               | 1,06   | ± .800 mm  | 27,7 mm  | 28,0 mm                    | 3,55  |
| 25,00 mm <sup>D</sup> | 1,00 pulgada <sup>D</sup>   | 1  | ± .800 mm  | 26,1 mm  | 26,4 mm                    | 3,55  |
| 22,4 mm               | 7/8 de pulgada              | 0,875  | ± .700 mm  | 23,4 mm  | 23,7 mm                    | 3,55  |
| 19,0 mm               | 3/4 de pulgada              | 0,750  | ± .600 mm  | 19,9 mm  | 20,1 mm                    | 3,15  |
| 16,0 mm               | 5/8 de pulgada              | 0,625  | ± .500 mm  | 16,7 mm  | 17,0 mm                    | 3,15  |
| 13,2 mm               | 0,530 pulgadas              | 0,530  | ± .410 mm  | 13,83 mm   | 14,05 mm                   | 2,80  |
| 12,5 mm <sup>D</sup>  | 1/2 de pulgada <sup>D</sup> | 0,500  | ± .390 mm  | 13,10 mm   | 13,31 mm                   | 2,50  |
| 11,2 mm               | 7/16 de pulgada             | 0,438  | ± .350 mm  | 11,75 mm   | 11,94 mm                   | 2,50  |
| 9,5 mm                | 3/8 de pulgada              | 0,375  | ± .300 mm  | 9,97 mm  | 10,16 mm                   | 2,24  |
| 8,0' mm               | 5/16 de pulgada             | 0,312  | ± .250 mm  | 8,41 mm  | 8,58 mm                    | 2,00  |
| 6,7 mm                | 0,265 pulgadas              | 0,265  | ± .210 mm  | 7,05 mm  | 7,20 mm                    | 1,80  |
| 6,3 mm <sup>D</sup>   | 1/4 de pulgada <sup>D</sup> | 0,250  | ± .200 mm  | 6,64 mm  | 6,78 mm                    | 1,80  |
| 5,6 mm                | No.3 1/2 <sup>E</sup>       | 0,223  | ± .180 mm  | 5,90 mm  | 6,04 mm                    | 1,60  |
| 4,75 mm               | No. 4                       | 0,187  | ± .150 mm  | 5,02 mm  | 5,14 mm                    | 1,60  |
| 4,00 mm               | No. 5                       | 0,157  | ± .130 mm  | 4,23 mm  | 4,35 mm                    | 1,40  |
| 3,35 mm               | No. 6                       | 0,132  | ± .110 mm  | 3,55 mm  | 3,66 mm                    | 1,25  |
| 2,80 mm               | No. 7                       | 0,110  | ± .095 mm  | 2,975 mm   | 3,070 mm                   | 1,12  |
| 2,36 mm               | No.8                        | 0,0937   | ± .080 mm  | 2,515 mm   | 2,600 mm                   | 1,00  |
| 2,00 mm               | No. 10                      | 0,0787   | ± .070 mm  | 2,135 mm   | 2,215 mm                   | 0,900   |
| 1,7 mm                | No. 12                      | 0,0661   | ± .060 mm  | 1,820 mm   | 1,890 mm                   | 0,800   |
| 1,4 mm                | No.14                       | 0,0555   | ± .050 mm  | 1,505 mm   | 1,565 mm                   | 0,710   |
| 1,18 mm               | No. 16                      | 0,0469   | ± .045 mm  | 1,270 mm   | 1,330 mm                   | 0,630   |
| 1,00 mm <sup>F</sup>  | No. 18                      | 0,0394   | ± .040 mm  | 1,080 mm   | 1,135 mm                   | 0,560   |
| 850 µm <sup>F</sup>   | No. 20                      | 0,0331   | ± 35 µm  | 925 µm   | 970 µm                     | 0,500   |
| 710 µm                | No. 25                      | 0,0278   | ± 30 µm  | 775 µm   | 815 µm                     | 0,450   |
| 600 µm                | No. 30                      | 0,0234   | ± 25 µm  | 660 µm   | 695 µm                     | 0,400   |
| 500 µm                | No. 35                      | 0,0197   | ± 20 µm  | 550 µm   | 585 µm                     | 0,315   |
| 425 µm                | No. 40                      | 0,0165   | ± 19 µm  | 471 µm   | 502 µm                     | 0,280   |
| 355 µm                | No. 45                      | 0,0139   | ± 16 µm  | 396 µm   | 426 µm                     | 0,224   |
| 300 µm                | No. 50                      | 0,0117   | ± 14 µm  | 337 µm   | 363 µm                     | 0,200   |
| 250 µm                | No. 60                      | 0,0098   | ± 12 µm  | 283 µm   | 306 µm                     | 0,160   |
| 212 µm                | No. 70                      | 0,0083   | ± 10 µm  | 242 µm   | 263 µm                     | 0,140   |
| 180 µm                | No. 80                      | 0,0070   | ± 9 µm   | 207 µm   | 227 µm                     | 0,125   |
| 150 µm                | No. 100                     | 0,0059   | ± 8 µm   | 174 µm   | 192 µm                     | 0,100   |
| 125 µm                | No. 120                     | 0,0049   | ± 7 µm   | 147 µm   | 163 µm                     | 0,090   |
| 106 µm                | No. 140                     | 0,0041   | ± 6 µm   | 126 µm   | 141 µm                     | 0,071   |
| 90 µm                 | No. 170                     | 0,0035   | ± 5 µm   | 108 µm   | 122 µm                     | 0,063   |
| 75 µm                 | No. 200                     | 0,0029   | ± 5 µm   | 91 µm  | 103 µm                     | 0,050   |
| 63 µm                 | No. 230                     | 0,0025   | ± 4 µm   | 77 µm  | 89 µm                      | 0,045   |
| 53 µm                 | No. 270                     | 0,0021   | ± 4 µm   | 66 µm  | 76 µm                      | 0,036   |
| 45 µm                 | No. 325                     | 0,0017   | ± 3 µm   | 57 µm  | 66 µm                      | 0,032   |
| 38 µm                 | No. 400                     | 0,0015   | ± 3 µm   | 48 µm  | 57 µm                      | 0,030   |
| 32 µm                 | No. 450                     | 0,0012   | ± 3 µm   | 42 µm  | 50 µm                      | 0,028   |
| 25 µm <sup>D</sup>    | No. 500                     | 0,0010   | ± 3 µm   | 34 µm  | 41 µm                      | 0,025   |
| 20 µm <sup>D</sup>    | No. 635                     | 0,0008   | ± 3 µm   | 29 µm  | 35 µm                      | 0,020   |

Fuente: NTC 32 – 2002<sup>18</sup>

De este proceso se obtienen datos en cuanto al porcentaje que pasa por cada una de las mallas el cual es graficado obteniendo la curva de distribución granulométrica (Ver Ilustración 13).

<sup>18</sup> NTC 32 – 2002. Tejido de alambre y tamices para propósitos de ensayo. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, ICONTEC. P. 4.

Ilustración 13 Gráfica de distribución granulométrica

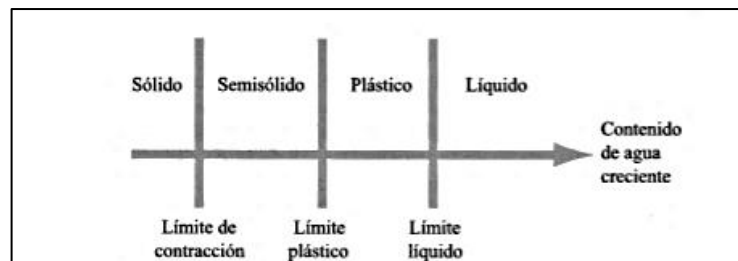


Fuente: Propia

#### 5.3.4.5. Límites de Atterberg

“El contenido de agua, en porcentaje, en el que la transición de estado sólido a semisólido tiene lugar, se define como límite de contracción. El contenido de agua en el que el punto de transición de estado semisólido a plástico es el límite plástico, y de estado plástico a líquido es el límite líquido. Esos límites se conocen como límites de Atterberg”<sup>19</sup>. (Ver Ilustración 14)

Ilustración 14 Gráfico de representación de los límites de consistencia.



Fuente: DAS, Braja M. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. International Thomson editores S.A. 2001.

En el caso de que un suelo arcilloso se mezcle con una cantidad determinada de agua, este se comporta como un semilíquido y a medida que el mismo se va secando va cambiando su comportamiento a la de un material plástico, semisólido o sólido. Como se observa en la anterior imagen el límite líquido (LL) se conoce como el porcentaje de contenido de agua con el cual el suelo cambia de estado líquido a estado plástico. De igual manera el límite plástico (PL) y el límite de contracción (SL), es el porcentaje de agua, gracias al cual el suelo cambia de estado plástico a semisólido y de estado semisólido a sólido respectivamente.

<sup>19</sup> DAS, Braja M. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. International Thomson editores S.A. 2001. P. 27.

Se debe tener en cuenta que la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico se define como el índice de plasticidad (PI), (Ver Ecuación 27 ).

$$PI = LL - PL$$

Ecuación 27

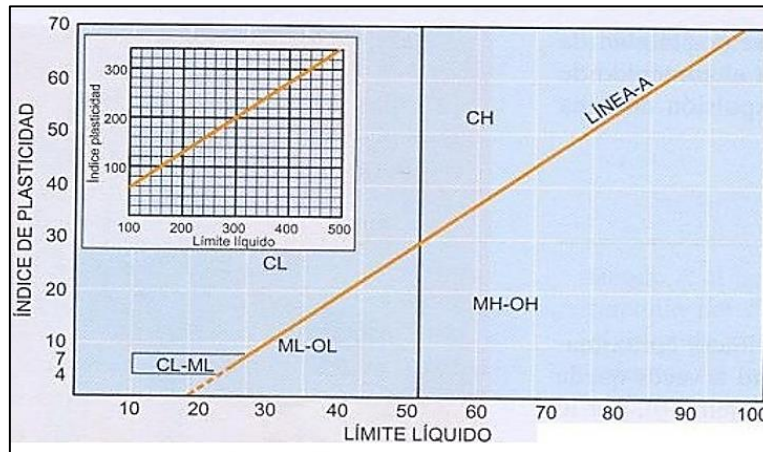
La literatura nos provee algunos valores típicos de distintos tipos de suelos en cuanto a sus límites líquido y plástico (Ver Tabla 4), de acuerdo a estos resultados los suelos pueden ser clasificados de acuerdo a la carta de plasticidad propuesta por Casa Grande (Ver Ilustración 15).

**Tabla 4 Valores típicos de límite líquido y plástico**

| <b>DESCRIPCIÓN</b>                           | <b>LIMITE LIQUIDO</b> | <b>LIMITE PLÁSTICO</b> |
|--|-----------------------|------------------------|
| Caolinita                                    | 35 – 100              | 25 – 35                |
| Illita                                       | 50 – 100              | 30 – 60                |
| Montmorillonita                              | 100 – 800             | 50 – 100               |
| Arcilla azul de Boston                       | 40                    | 20                     |
| Arcilla de Chicago                           | 60                    | 20                     |
| Arcilla de Louisiana                         | 75                    | 25                     |
| Arcilla de Londres                           | 66                    | 27                     |
| Arcilla de Cambridge                         | 39                    | 21                     |
| Arcilla de Montana                           | 52                    | 18                     |
| Lodo arcillosos de Mississippi               | 95                    | 32                     |
| Suelos de loess del norte y noreste de China | 25 – 35               | 15 – 20                |

*Fuente: GONZALES DE VALLEJO, Luis, FERRER Mercedes, ORTUÑO Luis, OTEO Carlos, Ingeniería Geológica, Madrid, España, 2004, p. 28.*

**Ilustración 15 Carta de plasticidad de Casa Grande**



Fuente: GONZALES DE VALLEJO, Luis, FERRER Mercedes, ORTUÑO Luis, OTEO Carlos, Ingeniería Geológica, Madrid, España, 2004, p. 24.

### 5.3.4.6. Permeabilidad

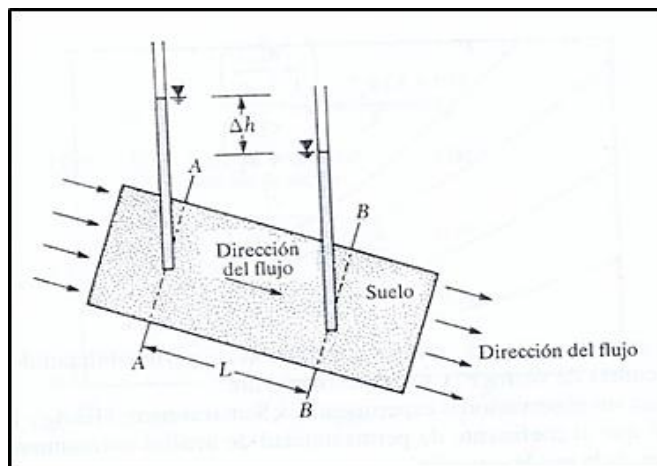
Los espacios generados en una masa de suelo permiten que el agua fluya a través de ellos.

Darcy (1856) propuso una metodología para calcular la velocidad del flujo de agua a través de un suelo (Ver Ecuación 28), gráficamente representado por la Ilustración 16.

$$V = k * i \quad \text{Ecuación 28}$$

Dónde:  $v$  = Velocidad de Darcy (cm/s)  
 $k$  = Coeficiente de permeabilidad del suelo (cm/s)  
 $i$  = Gradiente hidráulico

**Ilustración 16 Definición de la ley de Darcy**



Fuente: BRAJA M. Das, Principios de cimentación, Edición 5, México D.F., Cengage Learning, 2008, p 21.

A continuación se presentan algunos valores típicos del coeficiente de permeabilidad para varios tipos de suelo, propuestos en los libros Principios de Cimentaciones de Braja M. Das e Ingeniería Geológica de Gonzales Vallejo (Ver Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7)

**Tabla 5 Valores del coeficiente de permeabilidad para varios tipos de suelo**

| Tipo de suelo                         | Coeficiente de permeabilidad, $k$ (cm/s) |
|---------------------------------------|--|
| Grava media a gruesa                  | Mayor que $10^{-1}$                      |
| Arena gruesa a fina                   | $10^{-1}$ a $10^{-3}$                    |
| Arena fina, arena, limosa             | $10^{-3}$ a $10^{-5}$                    |
| Limo, limo arcillosos, arcilla limosa | $10^{-4}$ a $10^{-6}$                    |
| Arcillas                              | $10^{-7}$ o menor                        |

Fuente: BRAJA M. Das, Principios de cimentación, Edición 5, México D.F., Cengage Learnign, 2008, p 21.

**Tabla 6 Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos**

| Tipo de suelo                     | $k$ (cm/s)                     |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| Grava mal graduada (GP)           | $\geq 1$                       |
| Grava uniforme (GP)               | 0.2 – 1                        |
| Grava bien graduada (GW)          | 0.05 – 0.3                     |
| Arena uniforme (SP)               | $5 \times 10^{-3}$ – 0.2       |
| Arena bien graduada (SW)          | $10^{-3}$ – 0.1                |
| Arena limosa (SM)                 | $10^{-3}$ – $5 \times 10^{-3}$ |
| Arena arcillosa (SC)              | $10^{-4}$ – $10^{-3}$          |
| Limo de baja plasticidad (ML)     | $5 \times 10^{-5}$ – $10^{-4}$ |
| Arcillas de baja plasticidad (CL) | $10^{-5}$ – $10^{-8}$          |

Fuente: Fuente: GONZALES DE VALLEJO, Luis, FERRER Mercedes, ORTUÑO Luis, OTEO Carlos, Ingeniería Geológica, Madrid, España, 2004, p. 30.

**Tabla 7 Relación aproximada entre la clasificación unificada y la permeabilidad**

| <b>Clasificación según sistema unificado</b> | <b>Permeabilidad relativa</b> | <b>Coefficiente de permeabilidad – k (cm/s)</b> |
|--|-------------------------------|---|
| GW   | Permeable                     | $10^{-3} - 10^{-1}$                             |
| GP   | Permeable a muy permeable     | $5 * 10^{-3} - 10$                              |
| GM   | Semipermeable                 | $10^{-7} - 10^{-2}$                             |
| GC   | Impermeable                   | $10^{-8} - 10^{-5}$                             |
| SW   | Permeable                     | $5 * 10^{-4} - 5 * 10^{-2}$                     |
| SP   | Semipermeable a permeable     | $5 * 10^{-5} - 5 * 10^{-4}$                     |
| SM   | Impermeable                   | $10^{-7} - 5 * 10^{-4}$                         |
| SC   | Semipermeable                 | $10^{-8} - 5 * 10^{-4}$                         |
| ML   | Impermeable                   | $10^{-8} - 5 * 10^{-4}$                         |
| CL   | Impermeable                   | $10^{-8} - 10^{-6}$                             |
| OL   | Impermeable                   | $10^{-8} - 10^{-5}$                             |
| MH   | Impermeable                   | $10^{-9} - 10^{-7}$                             |
| CH   | Muy impermeable               | $10^{-10} - 10^{-8}$                            |





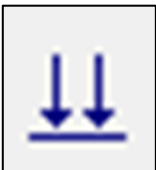



*Fuente: MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA, Manual de drenaje para carreteras, Bogotá D.C., Colombia, Consorcio ALFA, 2009, p 5.29.*

### **5.3.5. Software Slide versión 6.0 de la casa Rocscience.**

El software Slide está diseñado para evaluar la estabilidad de taludes en 2D, teniendo en cuenta superficies de falla circulares, no circulares, y conociendo de igual manera la diferencia entre laderas de suelo o de roca, identificando los propios criterios de falla que maneja el programa (Mohr – Coulomb, Hoek – Brown, Hoek – Brown generalizado, entre otros), con inclusión de los parámetros geotécnicos y de permeabilidad propios del material sobre el cual se realizan los estudios de estabilidad.

De igual manera para la elaboración del presente proyecto se empleó una herramienta con la que cuenta el software Slide y la cual es el análisis de la estabilidad de taludes por medio de los elementos finitos, con el cual se puede conocer el efecto directo que tiene la implementación de drenes en el cálculo del factor de seguridad de un talud, lo cual es el objetivo principal de este proyecto de grado.

Tabla 8 Convenciones del método de elementos finitos para el software Slide.

| SIMBOLO   | CONVENCION                       | SIGNIFICADO   |
|---|----------------------------------|---|
|    | <i>Total Head (H)</i>            | Se utiliza principalmente para la identificación de las alturas totales de la tabla de agua   |
|    | <i>Zero Pressure (P = 0)</i>     | Con esta convención se identifica las zonas de presión cero dentro del sistema en estudio.  |
|    | <i>Nodal Flow Rate (Q)</i>       | Con la utilización de esta convención se puede conocer la velocidad del flujo en un nodo determinado  |
|    | <i>Normal Infiltration (q)</i>   | Aplicando esta convención se puede simular la entrada de agua por medio de la infiltración teniendo en cuenta que la inclinación de entrada de dicha infiltración será de 90 ° con respecto a la superficie correspondiente.                              |
|  | <i>Vertical Infiltration (q)</i> | A diferencia de la anterior convención, con esta se puede modelar la entrada de agua por medio de la infiltración, pero el ángulo de entrada de este fluido será siempre el mismo sin importar el ángulo de inclinación de la superficie correspondiente. |
|  | <i>Unknown (P = 0 or Q = 0)</i>  | Se utiliza principalmente cuando no se tiene conocimiento si el nodo en el que se está trabajando es de presión o de caudal, es recomendable utilizar en superficies que tiene alguna inclinación.  |
|  | <i>Pressure Head (PH)</i>        | Con esta convención se puede conocer la cabeza de presión en cualquiera de los nodos que se están trabajando en el sistema.   |
|  | <i>None</i>                      | Su uso se centra en la eliminación de las convenciones que se tiene en los diferentes nodos de estudio del sistema.   |

Fuente: Propia

## 6. DISEÑO METODOLÓGICO

### 6.1. ENFOQUE METODOLÓGICO

Cuantitativo: A partir de datos geo-mecánicos obtenidos por medio de estudios geotécnicos referenciados en los antecedentes del presente trabajo de grado, se realizó un análisis numérico de la influencia de la aplicación de drenes horizontales en el abatimientos del nivel freático y el cálculo del factor de seguridad de un talud.

### 6.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Experimental: Con base en una serie de modelaciones, con datos y propiedades específicas, se obtuvo una serie de ábacos para el diseño e implementación de drenes horizontales en la estabilidad de taludes.

### 6.3. FASES DE LA INVESTIGACIÓN

#### 6.3.1. Fase I

Tabla 9 Fase uno del diseño metodológico

| <b>ACTIVIDAD:</b> Definición de los materiales a utilizar en las modelaciones propuestas |  |
|--|--|
| <i>ACTIVIDAD 1</i>   | Se definieron los materiales y sus respectivos parámetros geo-mecánicos con los cuales se realizaron las modelaciones.   |
| <i>ACTIVIDAD 2</i>   | Se definieron los parámetros geométricos de los distintos taludes que se emplearon en las modelaciones propuestas, y de esta manera se realizaron los modelos en el software especializado y Auto CAD. |
| <i>ACTIVIDAD 3</i>   | Se definieron las propiedades geométricas de los drenes que se emplearon en los modelos propuestos.  |

*Fuente: Propia*

#### 6.3.2. Fase II

Tabla 10 Fase dos del diseño metodológico

| <b>ACTIVIDAD:</b> Realizar las modelaciones en el software SLIDE® |   |
|---|---|
| <i>ACTIVIDAD 1</i>  | Se realizaron las modelaciones de los distintos sistemas de estabilidad para taludes sin la implementación de los drenes, y se utilizaron los datos obtenidos en cuanto al factor de seguridad como datos de entrada en los ábacos finales. |

|                    |  |
|--------------------|--|
| <i>ACTIVIDAD 2</i> | Se realizaron las modelaciones de los distintos sistemas de estabilidad de taludes con la implementación de los diferentes drenes, y se generó una primera comparación con los datos obtenidos en la actividad anterior. |
|--------------------|--|

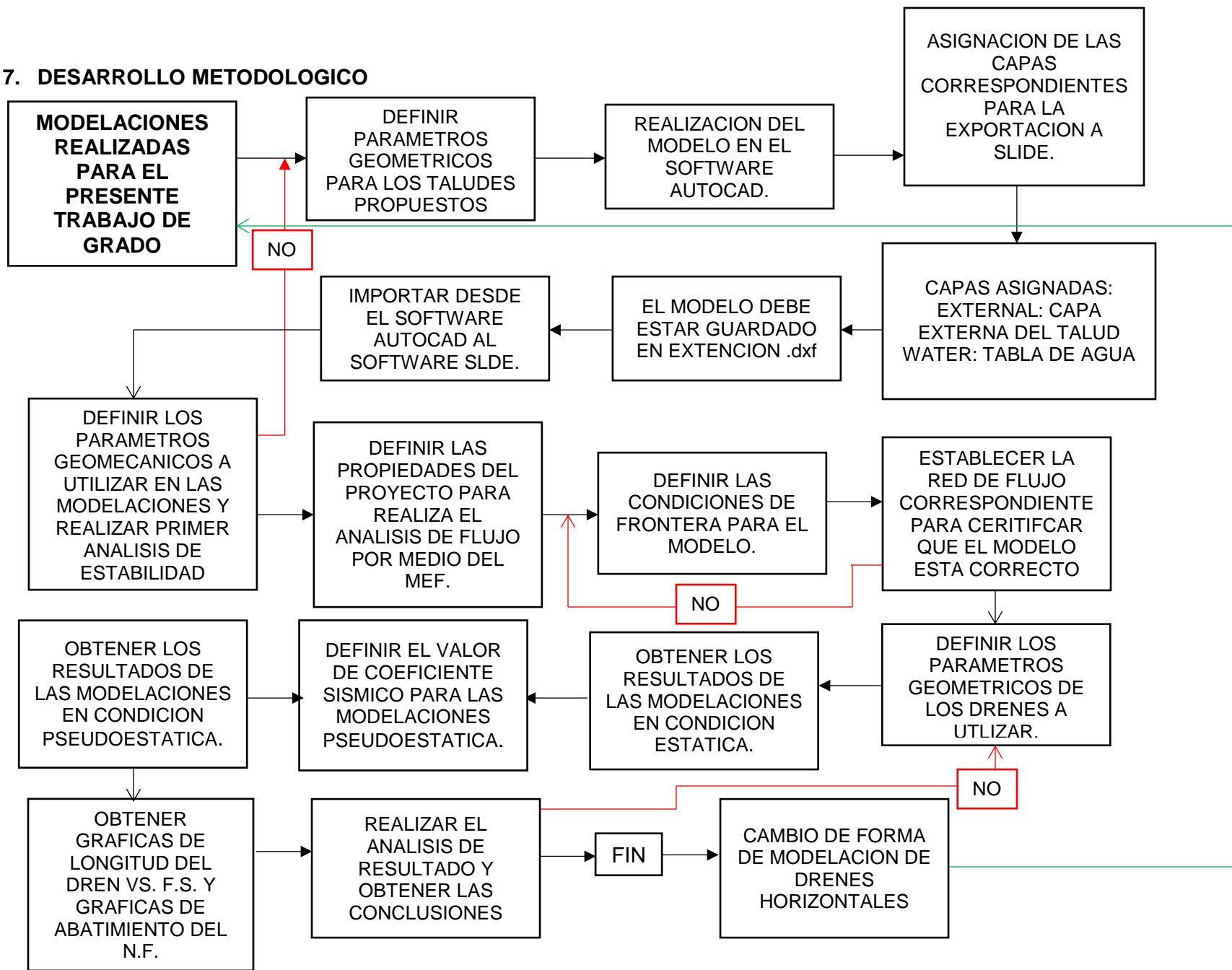
*Fuente: Propia*

### 6.3.3. Fase III

**Tabla 11 Fase tres del diseño metodológico**

|   |   |
|---|---|
| <b>ACTIVIDAD:</b> Realizar las modelaciones en el software SLIDE® |   |
| <i>ACTIVIDAD 1</i>  | Se realizó un análisis de los datos obtenidos en el proceso de modelación, con estos resultados, se creó una serie de ábacos que se utilizarán como guía metodológica en el diseño de drenes sub-horizontales para la estabilidad de taludes. |

## 7. DESARROLLO METODOLOGICO



El anterior diagrama presenta un paso a paso de la realización de las modelaciones que se presentan en este trabajo de grado, dentro de este diagrama se pueden observar tres condicionales los cuales se explicaran a continuación:

### 7.1. Condicional I

Luego de definir los parámetros geo-mecánicos que se van a utilizar en las diferentes modelaciones se espera cumplir con los factores de seguridad propuestos por la NSR-10 en el título H, los cuales se presentan a continuación:

**Tabla 12 Factores de seguridad mínimos directos**

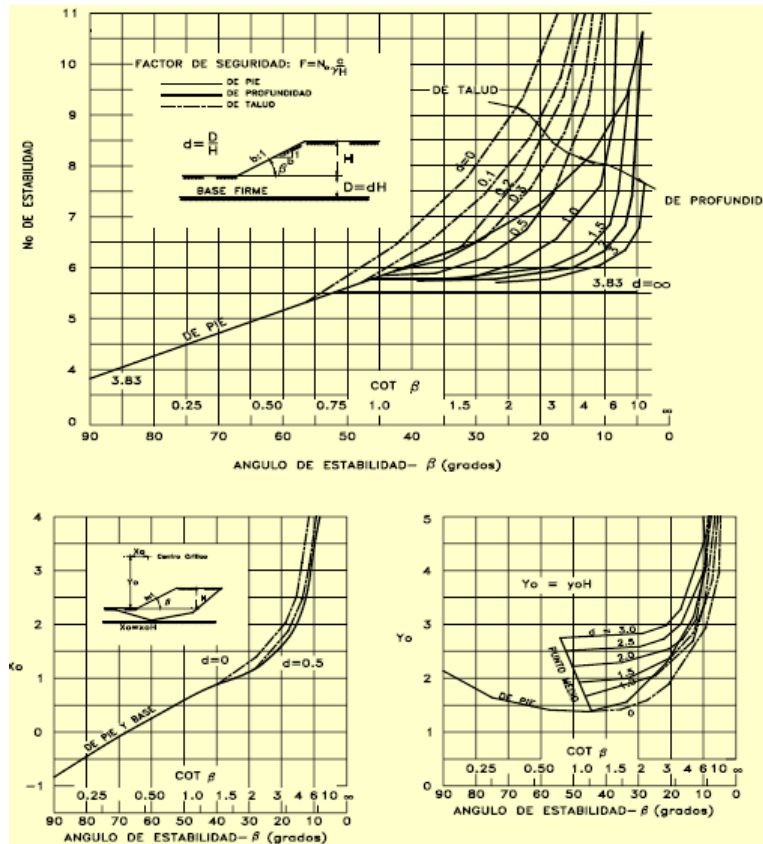
| CONDICION  | FS     | FS           |
|--|--------|--------------|
|  | DISEÑO | CONSTRUCCION |
| Taludes – Condición estática y agua subterránea normal.  | 1.50   | 1.25         |
| Taludes – Condición Seudo-estatica con agua subterránea normal y coeficiente sísmico de diseño | 1.05   | 1.00 (*)     |

*Fuente: NSR – 10 TITULO H*

### 7.2. Condicional II

Definidas las propiedad del proyecto para realizar el análisis por medio del método de elementos finitos se debe verificar la red de flujo que se obtiene teniendo en cuenta que teóricamente las líneas equipotenciales deben estar a 90 grados de las líneas de flujo, si esto es correcto la metodología puede continuar de lo contrario se debe volver a revisar dichas condiciones de frontera. Cabe resaltar que la mayoría de líneas equipotenciales convergen en la parte de la pata del talud por lo cual se considera que un dren colocado en esta parte tendrá un efecto mayor que en cualquier otro lugar, sin embargo esto también tiene que ver con la superficie de falla que se genere, lo cual depende de las propiedades geométricas del talud, teniendo en cuenta el ábaco propuesto por Jambu que se presenta a continuación.

**Ilustración 17 Abaco de Jambu de las superficies de falla posibles.**



Fuente: Estabilidad de taludes en zonas tropicales – Jaime Suares Díaz

### 7.3. Condicional III

El último condicional se realiza una vez obtenidas las gráficas de longitud del dren Vs. Factor de seguridad y del abatimiento del nivel freático teniendo en cuenta cada uno de los niveles freáticos que se obtuvieron con la inclusión de los drenes, ya que con base en los conos de abatimiento que se pueden observar, se pueden establecer condiciones o tendencias físicamente imposibles, lo que conlleva a replantear los parámetros geométricos de los drenes utilizados.

### 7.4. Recomendación final

Se observa que dentro de las limitaciones del software Slide®, no existe un elemento como tal que represente al dren, por lo cual existen dos maneras de simular dicho elemento, una es simular una línea de presión cero lo cual busca llevar el flujo de una cabeza de energía mayor a una cabeza de energía menor, la segunda forma de modelar los drenes es simulando un material altamente permeable, por lo cual se recomienda utilizar las dos manera de modelar los drenes con el fin de realizar la comparación entre los resultados de las dos modelaciones.

## 8. MODELO INICIAL

En el presente numeral se muestra el modelo inicial que se trabajó en este proyecto de grado, con el cual se presentan los parámetros tanto geométricos como geo-mecánicos de los taludes en estudio, y de igual manera los resultados iniciales en cuanto a factor de seguridad. Cabe resaltar que para este caso se trabajaron sobre factores de seguridad aun por encima de los valores que se presentaron anteriormente de la norma NSR-10 en su título H.

### 8.1. Parámetros geométricos de los taludes.

Para el presente proyecto se emplearon los siguientes parámetros geométricos teniendo en cuenta las superficies de falla teóricas que se podían presentar con base en las alturas e inclinaciones mencionadas, teniendo en cuenta la teoría propuesta en los ábacos de Jambu presentado en la Ilustración 17 del presente documento.

Tabla 13 Parámetros geométricos iniciales de los taludes.

| ALTURA DEL TALUD (m) | INCLINACION DEL TALUD (GRADOS) |
|----------------------|--------------------------------|
| 10                   | 30                             |
|                      | 40                             |
|                      | 50                             |
| 15                   | 30                             |
|                      | 40                             |
|                      | 50                             |
| 20                   | 30                             |
|                      | 40                             |
|                      | 50                             |

*Fuente: Propia*

### 8.2. Parámetros geo-mecánicos de los materiales a utilizar.

Para las modelaciones propuestas en el presente trabajo de grado se utilizaron tres tipos de suelo, los cuales fueron arcillas, limos y arenas, y de los cuales los parámetros geo-mecánicos fueron obtenidos del estudio de microzonificación sísmica realizado en la ciudad de Santiago de Cali, ya que esta fue la fuente que presentaba la mayor cantidad

de datos y resultado en cuanto a este tema, y que siendo los más importante la obtención de estos resultados es de dominio público.

Cabe resaltar que para efectos del presente trabajo de grado se hace indiferente el factor de seguridad obtenido, ya que si el factor está por encima de los valores presentados en la Tabla 12, aunque se recomienda que se siga la recomendación mostrada en el numeral 7.1 que habla del condicional I.

A continuación se presentan los parámetros geo-mecánicos empleados:

**Tabla 14 Parámetros geo-mecánicos del material tipo arcilla.**

| <b>MATERIAL: ARCILLA</b>                        |             |
|---|-------------|
| <b>PARAMETRO</b>                                | <b>DATO</b> |
| <b>Clasificación USCS</b>                       | CH          |
| <b>Hn (%)</b>                                   | 43.51       |
| <b>LL</b>                                       | 81.64       |
| <b>LP</b>                                       | 34.59       |
| <b>IP</b>                                       | 47.05       |
| <b><math>\gamma_t</math> (Kn/m<sup>3</sup>)</b> | 18          |
| <b>G<sub>s</sub></b>                            | 2.70        |
| <b>c<sub>CD</sub> (Kn/m<sup>2</sup>)</b>        | 30          |
| <b>∅<sub>CD</sub> (Grados)</b>                  | 23          |
| <b>e<sub>0</sub></b>                            | 1.12        |
| <b>RSC</b>                                      | 3.13        |

Fuente: INGEOMINAS, Subdirección de amenazas geológicas y entorno ambiental, Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali, Santiago de Cali, Colombia, 2002.

**Tabla 15 Parámetros geo-mecánicos del material tipo limo.**

| <b>MATERIAL: LIMO</b>     |             |
|---------------------------|-------------|
| <b>PARAMETRO</b>          | <b>DATO</b> |
| <b>Clasificación USCS</b> | MH          |
| <b>Hn (%)</b>             | 47.95       |
| <b>LL</b>                 | 72.79       |

|  |       |
|--|-------|
| <b>LP</b>                                | 37.37 |
| <b>IP</b>                                | 34.04 |
| $\gamma_t \left( \frac{Kn}{m^3} \right)$ | 17    |
| $G_s$                                    | 2.68  |
| $C_{CD} \left( \frac{Kn}{m^2} \right)$   | 56    |
| $\phi_{CD} \text{ (Grados)}$             | 25    |
| $e_0$                                    | 1.21  |
| <b>RSC</b>                               | 2.25  |

Fuente: INGEOMINAS, Subdirección de amenazas geológicas y entorno ambiental, Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali, Santiago de Cali, Colombia, 2002.

Tabla 16 Parámetros geo-mecánicos del material tipo arena.

| <b>MATERIAL: ARENA</b>                   |             |
|--|-------------|
| <b>PARAMETRO</b>                         | <b>DATO</b> |
| <b>Clasificación USCS</b>                | SM          |
| $H_n \text{ (%)}$                        | 27.72       |
| $\gamma_t \left( \frac{Kn}{m^3} \right)$ | 17.2        |
| $G_s$                                    | 2.69        |
| $C_{CD} \left( \frac{Kn}{m^2} \right)$   | 8           |
| $\phi_{CD} \text{ (Grados)}$             | 35          |
| $e_0$                                    | 1.01        |
| <b>RSC</b>                               | 1.38        |

Fuente: INGEOMINAS, Subdirección de amenazas geológicas y entorno ambiental, Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali, Santiago de Cali, Colombia, 2002.

### 8.3. Coeficientes de permeabilidad de los materiales utilizados.

En el software Slide® cuando se trabaja por el método de elementos finitos se debe establecer los valores del coeficiente de permeabilidad (k), los cuales se obtuvieron desde la teoría que se revisó para la realización del presente trabajo de grado, teniendo los siguientes datos:

Tabla 17 Relaciones aproximadas entre la clasificación unificada y la permeabilidad.

| <b>Clasificación según sistema de clasificación unificado.</b> | <b>Permeabilidad relativa</b> | <b>Coeficiente de permeabilidad – k (cm/s)</b> |
|--|-------------------------------|--|
| SM (Arena)   | Impermeable                   | $10^{-4}$                                      |

|              |                 |            |
|--------------|-----------------|------------|
| MH (Limo)    | Impermeable     | $10^{-7}$  |
| CH (Arcilla) | Muy impermeable | $10^{-10}$ |

Fuente: Manual de drenaje para Carreteras – Ministerio de transporte de Colombia.

#### 8.4. Coeficiente sísmico empleado en las modelaciones pseudo-estáticas.

Los datos o parámetros geo-mecánicos que se emplearon fueron tomados de la ciudad de Santiago de Cali, por lo cual apoyado en el título A de la NSR-10 se tomaron los valores de coeficiente sísmico que se utilizaron para las modelaciones pseudo-estático.

Tabla 18 Coeficiente sísmico de la ciudad de Santiago de Cali.





| CIUDAD | COEFICIENTE SISMICO | ZONA DE AMENSA SISMICA |
|--------|---------------------|------------------------|
| CALI   | 0,25                | ALTA                   |

Fuente: NSR-10, Título A.

#### 8.5. Condiciones de frontera utilizadas por el software Slide® en el método de elementos finitos.

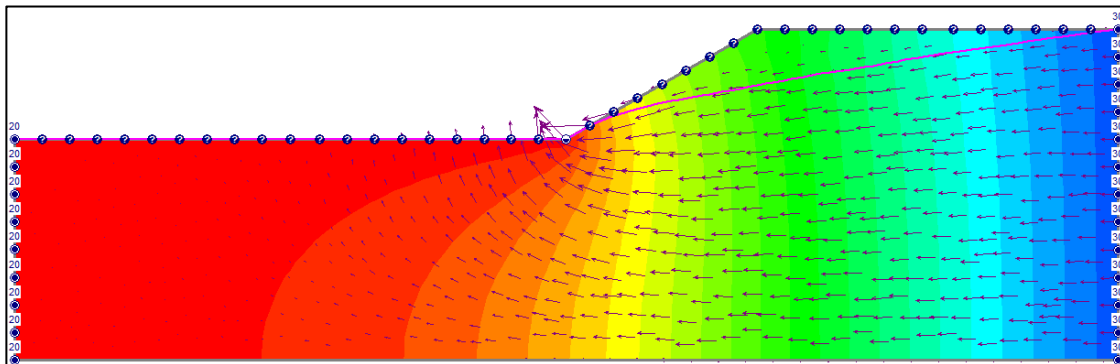
Con el objetivo de observar el comportamiento del flujo en los taludes empleados, el software presenta el método de elementos finitos, para efectos del presente trabajo de grado se emplearon las siguientes convenciones y se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 19 Convenciones empleadas en el análisis de flujo.

| SIMBOLO   | CONVENCION                      | SIGNIFICADO  |
|---|---------------------------------|--|
|  | <i>Total Head (H)</i>           | Se utiliza principalmente para la identificación de las alturas totales de la tabla de agua  |
|  | <i>Zero Pressure (P = 0)</i>    | Con esta convención se identifica las zonas de presión cero dentro del sistema en estudio.   |
|  | <i>Unknown (P = 0 or Q = 0)</i> | Se utiliza principalmente cuando no se tiene conocimiento si el nodo en el que se está trabajando es de presión o de caudal, es recomendable utilizar en superficies que tiene alguna inclinación. |
|  | <i>None</i>                     | Su uso se centra en la eliminación de las convenciones que se tiene en los diferentes nodos de estudio del sistema.  |

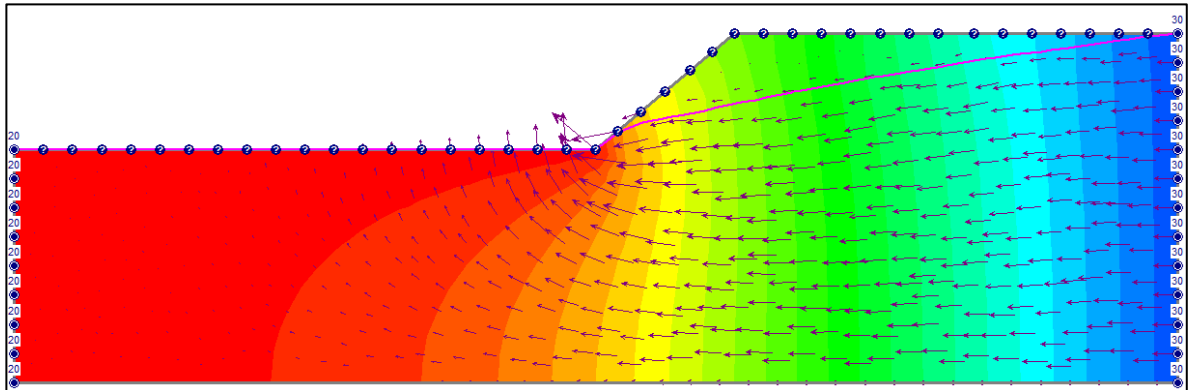
Fuente: Propia

Ilustración 18 Red del flujo del talud de 10 metros de altura y 30° de inclinación.



Fuente: Propia

Ilustración 19 Red del flujo del talud de 10 metros de altura y 40° de inclinación.



Fuente: Propia

### 8.6. Resultados de las modelaciones en condición inicial.

Una vez establecidos los parámetros geométricos de los taludes, y los parámetros geomecánicos de los materiales o tipos de suelos empleados, se realizaron las modelaciones iniciales es decir sin drenes, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 20 Resultados de las modelaciones iniciales realizadas.

| MATERIAL | ALTURA (m) | INCLINACION DEL TALUD (GRADOS) | F.S (ESTATICO) | F.S (PSEUDO-ESTATICO) |
|----------|------------|--------------------------------|----------------|-----------------------|
| ARCILLAS | 10         | 30                             | 1,95           | 1,21                  |
|          |            | 40                             | 1,82           | 1,22                  |
|          |            | 50                             | 1,64           | 1,23                  |
|          | 15         | 30                             | 1,45           | 0,95                  |
|          |            | 40                             | 1,36           | 0,98                  |
|          |            | 50                             | 1,24           | 0,95                  |
|          | 20         | 30                             | 1,28           | 0,85                  |
|          |            | 40                             | 1,07           | 0,78                  |
|          |            | 50                             | 1,01           | 0,76                  |
| LIMOS    | 10         | 30                             | 3,06           | 1,71                  |
|          |            | 40                             | 2,89           | 1,70                  |
|          |            | 50                             | 2,68           | 1,71                  |
|          | 15         | 30                             | 2,21           | 1,39                  |
|          |            | 40                             | 2,10           | 1,40                  |
|          |            | 50                             | 1,96           | 1,41                  |

|        |    |    |      |      |
|--------|----|----|------|------|
| ARENAS | 20 | 30 | 1,87 | 1,19 |
|        |    | 40 | 1,63 | 1,16 |
|        |    | 50 | 1,54 | 1,16 |
|        | 10 | 30 | 1,52 | 1,00 |
|        |    | 40 | 1,36 | 0,99 |
|        |    | 50 | 1,21 | 0,92 |
|        | 15 | 30 | 1,15 | 0,76 |
|        |    | 40 | 1,07 | 0,77 |
|        |    | 50 | 0,96 | 0,71 |
|        | 20 | 30 | 1,10 | 0,73 |
|        |    | 40 | 0,82 | 0,56 |
|        |    | 50 | 0,76 | 0,54 |

*Fuente: Propia*

### 8.7. Parámetros geométricos de los drenes a utilizar.

Una vez establecidos los factores de seguridad iniciales de los taludes sin la inclusión de los drenes, se procede a incluir dichos drenes y observar cuál es su efecto tanto en el aumento del factor de seguridad como del abatimiento del nivel freático.

Los resultados de las distintas modelaciones se presentan en toda su extensión, dentro de los anexos que se presentan en la Tabla 22.

A continuación se presentan los parámetros geométricos de los drenes:

**Tabla 21 Parámetros geométricos de los drenes.**

| LONGITUD DE DREN (m) | INCLINACION DE DREN (GRADOS) |
|----------------------|------------------------------|
| 5                    | 0                            |
| 10                   | 5                            |
| 20                   | 10                           |
| 30                   | 15                           |

*Fuente: Propia*

## 9. RESULTADOS

En la Tabla 22, que se presenta a continuación, se muestran los anexos donde se pueden observar en toda su extensión los resultados obtenidos con base en las modelaciones realizadas en el software Slide® y AutoCAD®, de igual manera los cuadros resumen elaborados en Microsoft Excel®.

**Tabla 22 Resumen de anexos proyecto de investigación.**

| <b>ANEXO</b> | <b>TITULO</b>   | <b>CONDICION</b> |
|--------------|---|------------------|
| A            | <i>Cuadro resumen y graficas de las modelaciones realizadas.</i>  | No aplica        |
| B            | <i>Esquemas de AutoCAD que representan el abatimiento máximo del nivel freático mediante la utilización de drenes de medido a la mitad del talud.</i>   | No Aplica        |
| C            | <i>Esquemas de AutoCAD que representan el abatimiento máximo del nivel freático mediante la utilización de drenes de medido en la corona del talud.</i> | No Aplica        |
| D            | <i>Redes de flujo obtenidas en talud de 20m e inclinación 60°</i>   | No Aplica        |

*Fuente: propia*

Los análisis e interpretación de los resultados expuestos en los anexos presentados en la tabla 10 se exponen en el numeral 5 que se encuentra a continuación.

## 10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente numeral se presenta el análisis de resultados de las gráficas obtenidas a partir de las modelaciones realizadas en el software AutoCAD y Slide, separando este análisis a cada uno de los materiales utilizados en dichas modelaciones (arcillas, arenas y limos).

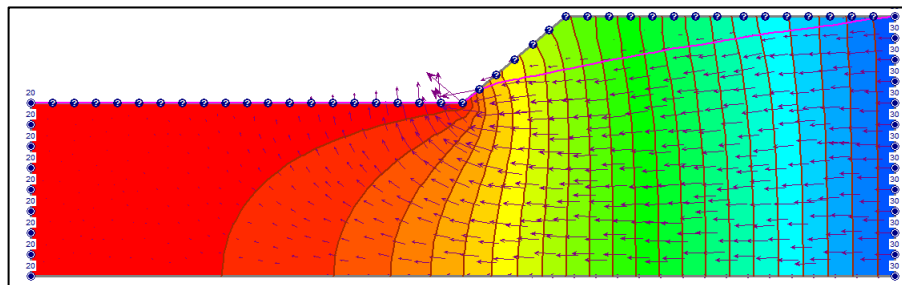
Se aclara que para el cumplimiento del objetivo principal del presente trabajo de grado se realizaron aproximadamente 900 modelaciones en Slide®, de las cuales se obtuvieron 72 graficas, de las cuales en los numerales 10.2, 10.3 y 10.4, se muestran las graficas mas representativas con su respectivo análisis, sin embargo para observar la totalidad de las gráficas se recomienda revisar el anexo a del trabajo en cuestión.

Las gráficas que se obtuvieron a raíz de las modelaciones realizadas en el software Slide, se pueden obtener valores efectivos de medidas como longitudes e inclinaciones, las cuales a su vez influyen directamente en la medida del abatimiento del N.F.

### 10.1. ANALISIS DE REDES DE FLUJO

Para poder tener la certeza de que los modelos realizados en el software Slide, fueron correctos se establece la red de flujo de los taludes propuestos teniendo en cuenta que el software toma como líneas de flujo las cabeza de presión y como líneas equipotenciales la cabeza total, en la Ilustración 20 se muestra la red de flujo obtenida para un talud en Arcila de 10 metros de altura e inclinación de 40°.

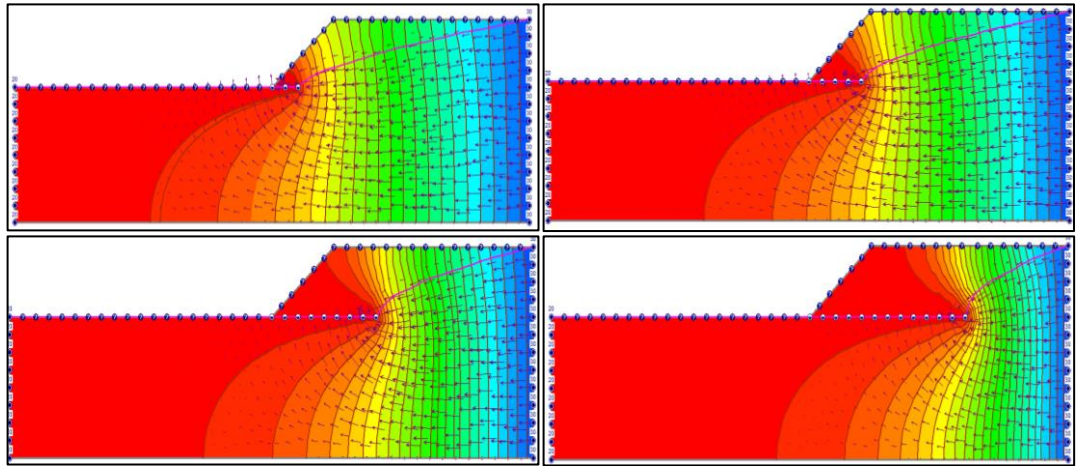
Ilustración 20 Esquema red de flujo



Fuente: propia

En la Ilustración 21 se muestra la alteración de la red de flujo para el mismo caso mostrado en la Ilustración 20 (anterior), que sufre luego de la inclusión de los drenes de 5, 10, 15 y 20 metros de longitud, a una inclinación de 0° ya que como se muestra en los numerales siguientes, es la inclinación efectiva.

**Ilustración 21 Esquema red de flujo para altura de talud de 10m con inclinación de 40°**



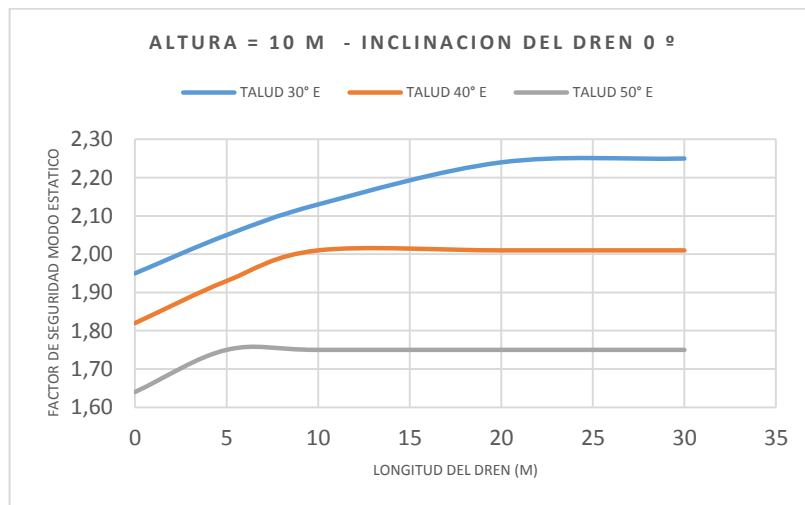
*Fuente: propia*

Como se observa en las redes de flujo obtenidas con la inclusion de los drenes a diferentes longitudes siempre manteniendo la inclinacion de 0°, ya que como se observa en las gráficas obtenidas es la inclinacion donde se presenta un mayor abatimiento del nivel freatico, las líneas de flujo y equipotenciales son alteradas de manera evidente ya que la línea de flujo presenta una direccion esperada hacia el dren y buscando que este salga del talud y el factor de seguridad pueda aumentar.

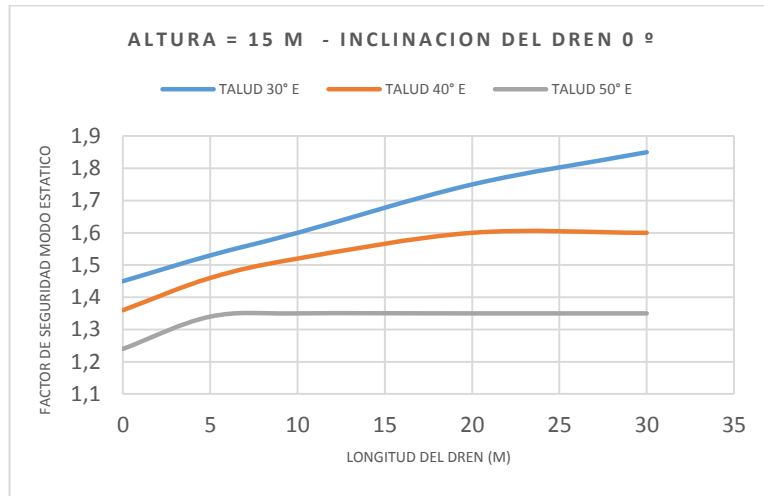
En los anexos 16, 17 y 18 se muestran las diferentes redes de flujo obtenidas

## 10.2. MATERIAL TIPO ARCILLA.

**Grafica 1 Longitud de dren Vs. Factor de seguridad.**

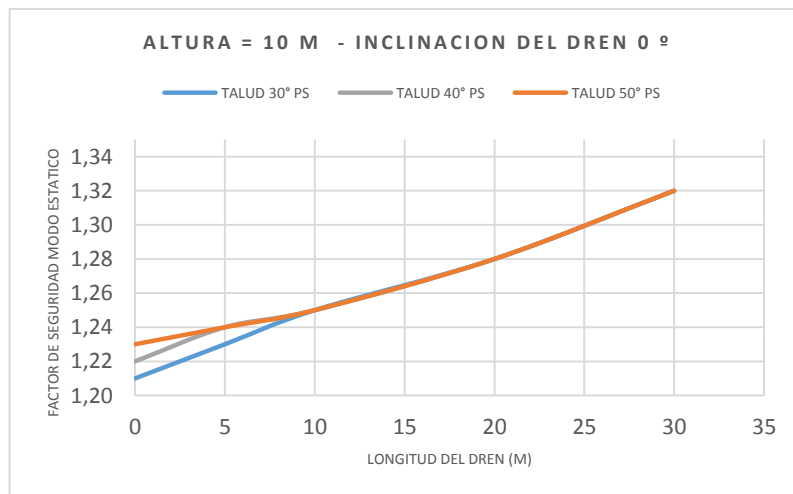


**Grafica 2 Longitud de dren Vs. Factor de seguridad.**

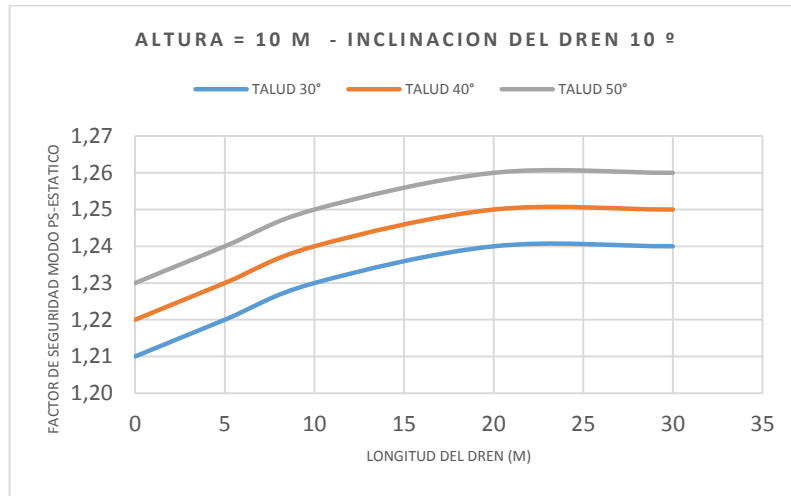


En la Grafica 1 y la Grafica 2 se observan los ábacos obtenidos a partir de las modelaciones en condición estática, donde se observa para las tres inclinaciones propuestas un comportamiento físico ideal, ya que a mayor inclinación del talud el factor de seguridad es menor, igualmente se puede observar que no es posible calcular o establecer una longitud de dren efectiva debido a que después de los 30 metros de longitud de dren, para los taludes de 30° y 40° de inclinación, el factor de seguridad tiene a seguir aumentando. Sin embargo para los taludes con inclinación de 50° se puede establecer una longitud efectiva de dren aproximadamente de 7 metros, ya que después de dicha longitud el factor de seguridad se estabiliza, este comportamiento se debe a la superficie de falla generada, y a la ubicación que tiene el dren dentro del modelo en cuestión ya que al ser una falla de pie un dren de menor longitud ubicado en la pata del talud retira el agua de la superficie de falla mejorando las condiciones de resistencia al corte de la misma.

**Grafica 3 Longitud de dren Vs. Factor de seguridad.**

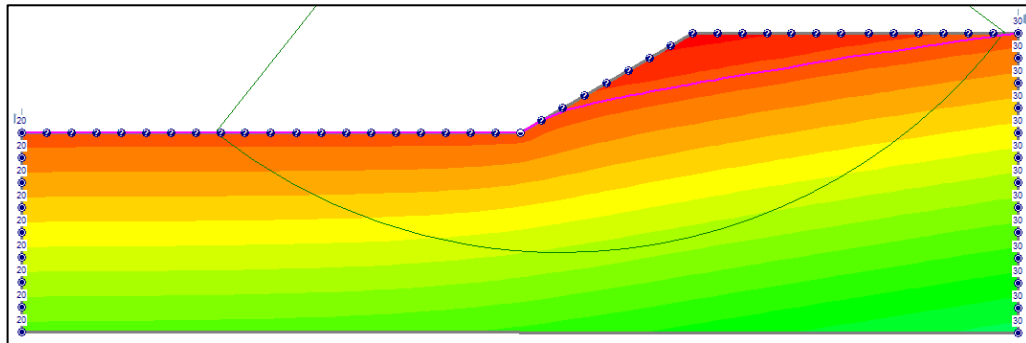


**Grafica 4 Longitud de dren Vs. Factor de seguridad.**



En la Grafica 3 y la Grafica 4 se observan los ábacos obtenidos a partir de las modelaciones realizadas en modo pseudo-estático, donde se pues inicialmente establecer que las tendencias de las curvas en cuestión, físicamente son imposibles ya que a mayor inclinación de talud es mayor el factor de seguridad, este comportamiento puede ser debido a una mala interpretación obtenida del software utilizado, ya que la superficie de falla que este toma como crítica, a mayor inclinación del talud es mayor, por lo cual aumenta su peso y de esta manera aumenta el factor de seguridad, las superficies de falla que se pueden observar son como las que se pueden apreciar en la Ilustración 22.

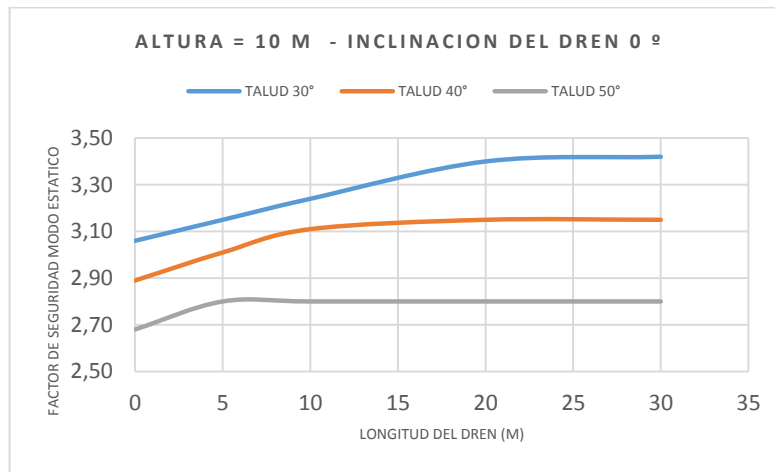
**Ilustración 22 Superficie de falla en condición Psuedo-estatica.**



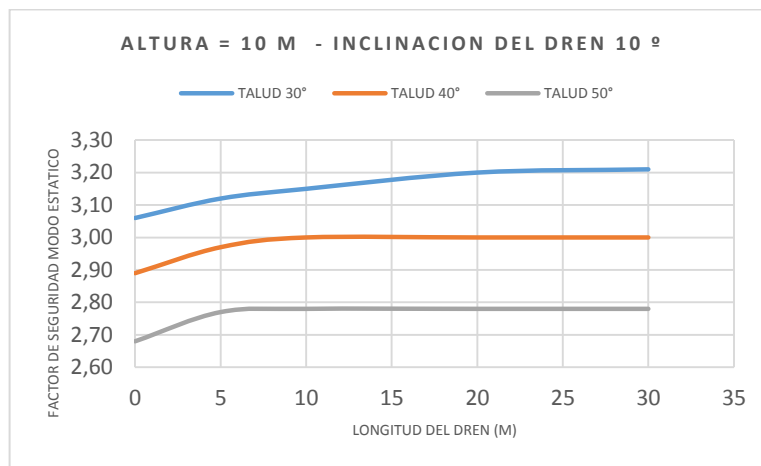
### 10.3. MATERIAL TIPO LIMO.

El comportamiento de las modelaciones del material tipo limo tanto en los ábacos como en el análisis de flujo es muy similar a la del material tipo arcilla, debido a la similitud de sus parámetros geo-mecánicos, y a los coeficientes de permeabilidad.

**Grafica 5 Longitud de dren Vs. Factor de seguridad.**

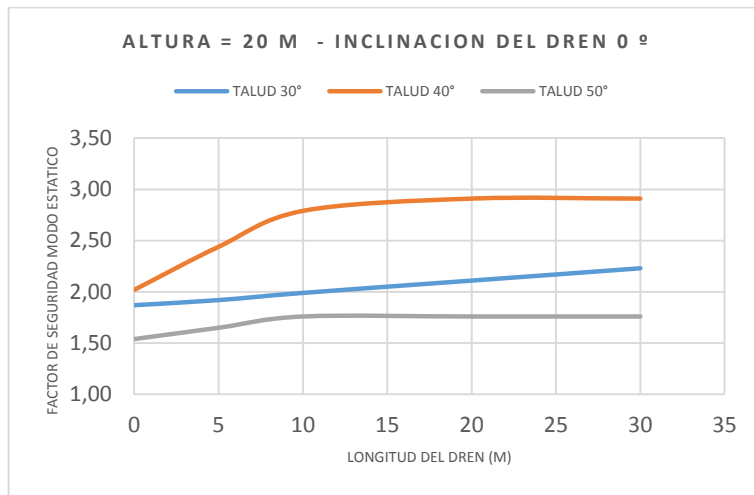


**Grafica 6 Longitud de dren Vs. Factor de seguridad.**

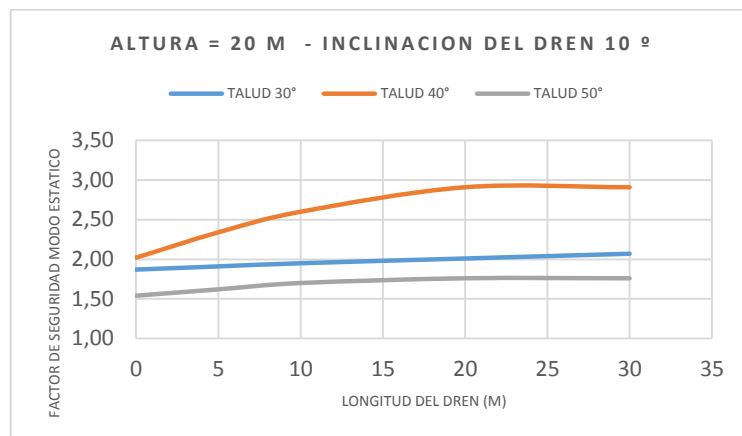


Se observa el comportamiento en modo estático en las Grafica 5 y Grafica 6, y en modo pseudo-estático en las gráficas 7 y 8.

**Grafica 7 Longitud de dren Vs. Factor de seguridad.**



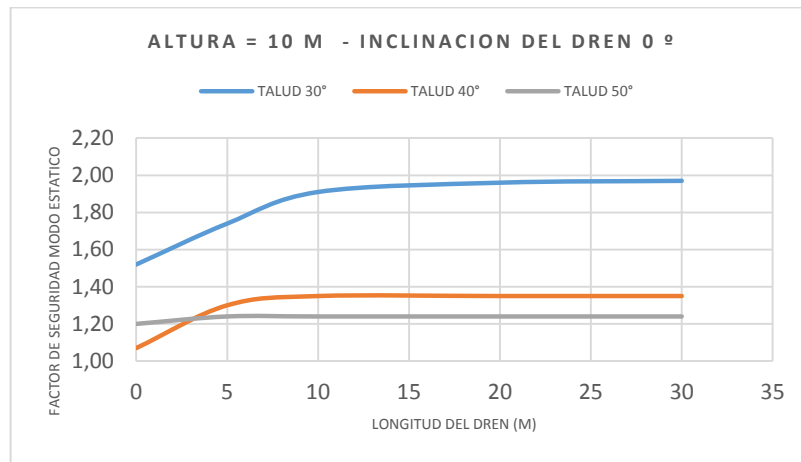
**Grafica 8 Longitud de dren Vs. Factor de seguridad.**



#### 10.4. MATERIAL ARENAS

Para las modelaciones realizadas en el material tipo arena, se observa un comportamiento físicamente posible tanto en las modelaciones estáticas como en las modelaciones pseudo-estáticas, las cuales se presentan a continuación.

**Grafica 9 Longitud de dren Vs. Factor de seguridad.**

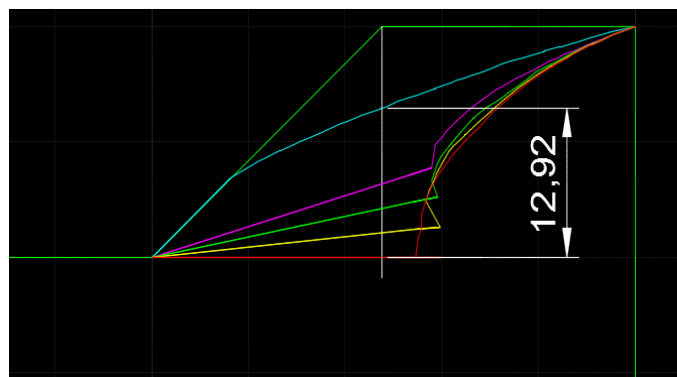


A comparación de los otros dos materiales modelados se puede observar que en estas graficas si se puede establecer una longitud efectiva de dren ya que en los taludes de inclinación de 30° y 40° el factor de seguridad se estabiliza después de los 10 metros de longitud, sin embargo en el talud de inclinación de 50° se observa que la curva tiene una tendencia completamente horizontal, este comportamiento es debido a la ubicación del dren y la superficie de falla generada en esta inclinación comprobando de esta manera la teoría propuesta por Jambu, muestra de esto se puede observar la Grafica 9.

#### **10.5. ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO MEDIDO EN LA CORONA DEL TALUD.**

Se observa que el mayor abatimiento que se logró del nivel freático, se presentó en el talud de 20 metros de altura e inclinación de 40°, con la inclusión de drenes de 30 metros de longitud instalados a una inclinación de 0°, abatimiento que tiene una medida de 12,92 metros, como se muestra en la Ilustración 23 del presente documento que representa la ilustración 34 del anexo N.

**Ilustración 23 Gráfica - mayor abatimiento. Corona del talud**

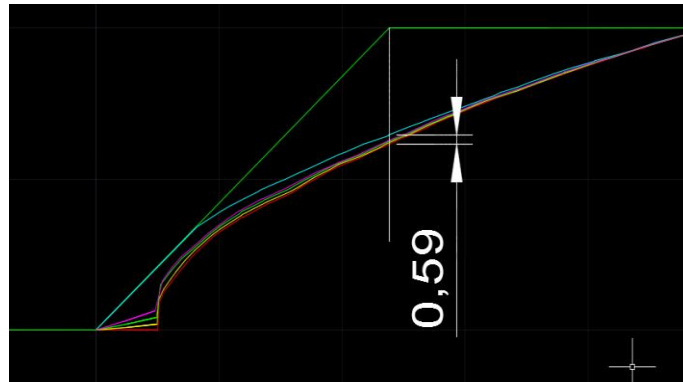


*Fuente: Propia*

Por otro lado el menor abatimiento que se registro fue el observado en el talud de 20 metros de altura e inclinación de 40°, con la inclusión de drenes de 5 metros con

inclinación de  $0^\circ$ , teniendo como medida 0,59 metros como se muestra en la Ilustración 24 del presente documento la cual representa la ilustración 7 del anexo N.

**Ilustración 24 Gráfica - menor abatimiento. Corona del talud**

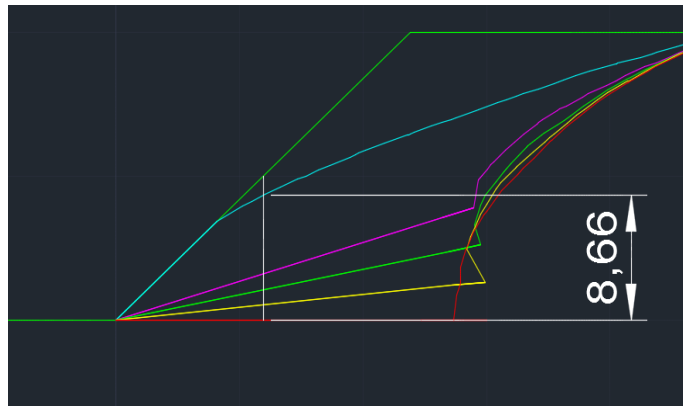


*Fuente: Propia*

#### **10.6. ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO MEDIDO A LA MITAD DEL TALUD.**

El abatimiento se midió de igual manera a la mitad de la cara del talud obteniendo que donde se registró el mayor abatimiento igual que en el anterior numeral fue en el talud de 20 metros de altura e inclinación de  $40^\circ$  con la inclusión de drenes de 30 metros de longitud e inclinación de  $0^\circ$ , donde se registró un abatimiento de 8,66 metros. Evidencia de esto se presenta la Ilustración 25 del presente documento que representa la ilustración 9 del anexo O.

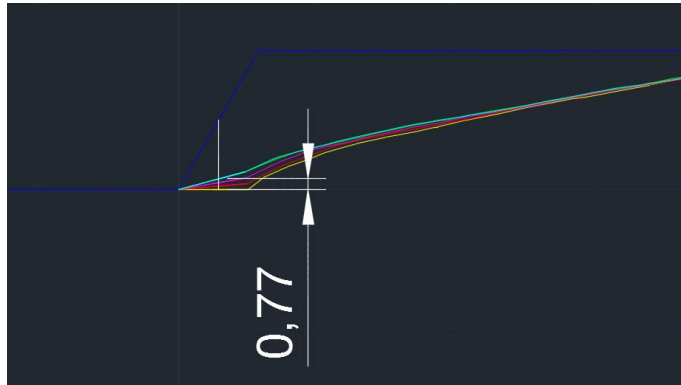
**Ilustración 25 Gráfica - mayor abatimiento. Mitad del talud**



*Fuente: Propia*

Mientras que el menor abatimiento se registró en el talud de 10 metros de altura e inclinación de  $60^\circ$  con la inclusión de drenes de 5 metros e inclinación de  $0^\circ$ , el cual registro una medida de 0,77 metros de abatimiento. Muestra de lo anterior se presenta la Ilustración 26 del presente documento que representa la ilustración 3 del anexo O.

Ilustración 26 Gráfica - menor abatimiento. Mitad del talud



Fuente: Propia

## 11. CONCLUSIONES

- Se definieron los parámetros geo-mecánicos de los materiales a utilizar en las modelaciones (arcillas, limos y arenas), a partir de la información recopilada en la primera fase del presente trabajo de grado, gracias al estudio de microzonificación sísmica realizada en la ciudad de Santiago de Cali, por el Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS), en compañía del Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA).
- Una vez obtenida la red de flujo correspondiente en el modelo inicial es decir sin drenes, se evidencio que las líneas equipotenciales convergen en la zona de la pata del talud por lo cual se consideró que un dren ubicado en dicha zona tendría un efecto mayor que en cualquier otra zona del talud, aunque esto depende totalmente de la superficie de falla formada en el talud y esta a su vez depende de las características geométricas del talud en cuestión.
- Se pudo comprobar la teoría propuesta en los ábacos de Jambu, en cuanto las superficies de falla, estableciendo que para inclinaciones menores caso 30 y 40 grados, la superficies de falla es profunda, mientras que para inclinaciones de talud de 50 y 60 grados la superficies de falla es de pie, de igual manera se muestras que es estas últimas inclinaciones al colocar el dren en la pata del talud su efecto no es significativo, debido a que con un dren de corta longitud el nivel freático se encuentra por fuera de la superficie de falla, lo cual genera que el factor de seguridad aumente.
- Se analizaron los resultados producto de las modelaciones realizadas de lo cual se concluyó que en cuanto al abatimiento del nivel freático, a mayor longitud de dren el abatimiento es mayor, obteniendo valores dependiendo del lugar de medición, mayores a los 10 metros medidos desde la posición inicial (sin drenes) del nivel freático.

Para la mayoría de los taludes modelados en cualquier de los tres (3) materiales utilizados, el factor de seguridad presenta un aumento con relación al factor de seguridad inicial, es decir el obtenido en las modelaciones sin drenes, de valores cercanos al 50% en los aumentos máximos, aunque también se debe aclarar que en algunos caso el dren genero un efecto contrario al esperado ya que el nivel freático supero el nivel inicial en cerca de 1 metro.

- Se generaron una serie de ábacos con base en las modelaciones realizadas, de las cuales se concluyó que los primero ábacos los cuales fueron realizados en cuanto a la longitud del dren comparado con el factor de seguridad, el comportamiento del factor de seguridad es directamente proporcional al aumento de la longitud del dren y a partir de esta comparación se pueden establecer longitudes efectivas de uso de dren para la estabilización de un talud. Para los segundos ábacos realizados, se comparó la inclinación del dren con el factor de

seguridad, donde el comportamiento del factor de seguridad es inversamente proporcional a la inclinación del dren, y con base en este comportamiento se pudieron establecer inclinaciones efectivas de dren. Las longitudes e inclinaciones de dren se pueden observar en el análisis de resultado del presente trabajo de grado.

## 12. RECOMENDACIONES

- Dentro de las recomendaciones se exponen las diversas limitaciones existentes en cuanto a parámetros geométricos de los drenes y taludes, parámetros geo mecánicos utilizados en las modelaciones y los métodos empleados para observar el comportamiento del flujo en el suelo y el cálculo del factor de seguridad.
- Para los parámetros geométricos de los taludes modelados, se especifica que el modelo que sujeto a correcciones realizadas en futuras investigaciones, ya que se tiene claro que existen taludes de menor y mayor altura que los que se trabajaron en el trabajo de grado que se presenta, también es importante decir y conocer que los taludes luego de inclinaciones mayores a  $60^{\circ}$  no presentan fallas de profundidad lo cual dificulta tener una clara evidencia de la influencia de los drenes.
- En cuanto a los parámetros geométricos de los drenes, el modelo queda sujeto a corrección sobre todo en cuanto a las longitudes de los drenes ya que a cierta inclinación, longitudes demasiadas largas generan el efecto contrario al esperado, ya que llevan el nivel freático a zonas donde no se encontraban disminuyendo el factor de seguridad.
- Los parámetros geo mecánicos utilizados en las modelaciones realizadas para el trabajo de grado, fueron tomados de diversos estudios realizados en la ciudad de Santiago de Cali, por lo cual se recomienda para futuras investigaciones que se pueden realizar con base en el presente trabajo de grado, lograr emplear parámetros geo mecánicos y de permeabilidad diferentes a los aquí utilizados y lejos del lugar mencionado (Santiago de Cali).
- Para el presente trabajo de grado se utilizaron para el cálculo del factor de seguridad lo métodos de Bishop simplificado y Jambu simplificado, aunque la modelación queda abierta a la utilización de los diversos métodos que existen a parte de los que se utilizaron es el presente trabajo de grado.

### 13. BIBLIOGRAFIA

DAS, Braja M. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. International Thomson editores S.A. 2001. 585. P.

HUACHO RAMOS, Miguel. Factores que influyen en la estabilidad de taludes. [Citado 29, Abril, 2015]. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/190822254/Factores-Que-Influyen-en-La-Estabilidad-de-Taludes#scribd>.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, ICONTEC .Servicios [En línea]. <http://www.icontec.org/index.php/es/inicio/comites-tecnicos-de-normalizacion> . [Consultado el 07 de Agosto de 2014].

GONZALES Carlos, DUSSAN Edgar, Modelación del flujo en taludes para drenes horizontales, Bogotá, 2011, 5p, Trabajo de grado (Maestría en Ingeniería Civil), Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de ingeniería 102. p.

GONZALES DE VALLEJO, Luis, FERRER Mercedes, ORTUÑO Luis, OTEO Carlos, Ingeniería Geológica, Madrid, España, 2004, 715.p.

MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Manual de drenaje para carreteras, Bogotá D.C., Colombia, Consorcio ALFA, 2009,

NTC 32 – 2002. Tejido de alambre y tamices para propósitos de ensayo. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, ICONTEC. P. 4.

SUAREZ, Jaime. Deslizamientos. Análisis Geotécnico Vol. 1. Bucaramanga. U.I.S. Escuela de filosofía, 2009. 588. p.

SUAREZ, J. (2009). Deslizamientos Técnicas de Remediación. Capítulo 12. Bucaramanga. U.I.S. Escuela de filosofía, 2009. 413 p.

## **ANEXOS**