

**ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LAS PRECIPITACIONES EN LA
ESTABILIDAD DE LOS TALUDES MEDIANTE METODOS
COMPUTACIONALES**

**LUIS FERNANDO CASTRO POLO
JORGE ARMANDO RAMÓN MEZA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

**ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LAS PRECIPITACIONES EN LA
ESTABILIDAD DE LOS TALUDES MEDIANTE METODOS
COMPUTACIONALES**

**LUIS FERNANDO CASTRO POLO
JORGE ARMANDO RAMÓN MEZA**

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

**Director
WILFREDO DELTORO RODRÍGUEZ
Ingeniero Civil, M.SC.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

Los logros obtenidos con la realización de esta tesis de grado, van dedicados a nuestros padres, familiares y amigos, quienes con palabras de motivación nos ayudaron a esforzarnos más, en nuestro proceso de formación como profesionales.

LUIS FERNANDO CASTRO POLO

JORGE ARMANDO RAMON MEZA

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos ante todo a Dios por darnos salud, por darnos la oportunidad de ser personas íntegras y profesionales.

También agradecemos al grupo de investigación GEOMÁTICA, por facilitarnos los programas computacionales usados en este proyecto, a los Ingenieros Hector Torres y Wilfredo del Toro Rodríguez por compartirnos parte de sus conocimientos para la elaboración de esta tesis.

LUIS FERNANDO CASTRO POLO

JORGE ARMANDO RAMON MEZA

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. EFECTOS DE LAS PRECIPITACIONES EN LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES	18
1.1 PRECIPITACIÓN	19
1.2 INFILTRACIÓN	19
1.3 ESCORRENTÍA	20
1.4 PRESIÓN DE POROS	21
1.5 EROSIÓN	22
1.6 CONTROL Y PREVENCIÓN DE LOS DESLIZAMIENTOS A CAUSA DE LAS LLUVIAS.	22
1.7 IDENTIFICACIÓN DEL SITIO	23
1.7.1 Litología general	23
1.7.2 Clima e hidrología	24
1.7.3 Topografía	25

1.8 TIPO DE FALLA ESPERADO	26
2. METODOLOGÍA	28
2.1 PLANTEAMIENTO DEL MODELO DEL PROBLEMA	28
2.2 FACTOR DE SEGURIDAD	28
2.3 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	29
2.3.1 Software Plaxis	30
2.4 PERFIL GEOTÉCNICO	31
2.5 ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DEL TALUD ANTES DE LA APLICACIÓN DEL RÉGIMEN DE LLUVIAS	32
2.5.1 Características del modelo	32
2.5.2 Elementos y mallado	32
2.5.3 Análisis de resultados	33
2.6 ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DEL TALUD, CON APLICACIÓN DE UN RÉGIMEN DE LLUVIAS.	36
2.6.1 Régimen de lluvias	36
2.6.2 Análisis de resultados después de un mes de lluvias	41

2.6.3	Análisis de resultados después de dos meses de lluvias	43
2.6.4	Resumen de resultados	44
2.7	MÉTODO DE EQUILIBRIO LÍMITE	45
2.7.1	Calculo del Factor de seguridad antes de un periodo de lluvias	46
2.7.2	Calculo del Factor de seguridad después de un mes de lluvias	47
2.7.3	Calculo del Factor de seguridad después de dos meses de lluvias	48
3.	CONCLUSIONES	50
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	51
	BIBLIOGRAFÍA	52

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ciclo hidrológico:	18
Figura 2. Deslizamiento de tierra, a causa del invierno en la vía Medellín – Santa Fe, en el sector de las Meloneras	20
Figura 3. Presión hidrostática sobre una superficie de falla inminente	21
Figura 4. Erosión por afloramiento de agua subterránea.	22
Figura 5. Carta climatológica medias mensuales Aeropuerto Palonegro Bucaramanga.	24
Figura 6. Seguimiento de Precipitación Decadal, anomalía de Lluvia Decadal, Aeropuerto Palonegro Bucaramanga, Diciembre 2014	25
Figura 7. Conformación del perfil del talud y del nivel freático	25
Figura 8. Aumento de presión de poros en el talud a causa de las lluvias.	26
Figura 9. Efectos de la estructura en la formación de deslizamientos a rotación.	27
Figura 10. <i>Posición de los nodos y los puntos de tensión en elementos de suelo.</i>	30
Figura 11. Ejemplo de un problema de deformación plana y de uno axisimétrico.	31
Figura 12. Geometría y estratigrafía del modelo	32
Figura 13. Malla de elementos finito	33
Figura 14. Malla de elementos finitos deformada	33
Figura 15. Contornos relativos a los desplazamientos dentro de la masa de tierra. Los colores amarillos y rojos indican las deformaciones mayores a 2 centímetros	34
Figura 16. Dirección de los esfuerzos efectivos principales. Valor del esfuerzo principal en la base talud =234,6 KN/m ²	34

Figura 17. Modelo de la falla del talud, deslizamiento rotacional típico.	35
Figura 18. Calculo del factor de seguridad. Valor $F.S=1.882$.	35
Figura 19. Seguimiento de lluvia diaria [mm], Octubre de 2014.	37
Figura 20. Modelo de Seguimiento de lluvia diaria Octubre de 2014 en Plaxis 2D.	37
Figura 21. Seguimiento de lluvia diaria [mm], Noviembre de 2014.	38
Figura 22. Modelo de Seguimiento de lluvia diaria Noviembre de 2014 en Plaxis 2D	38
Figura 23. Contornos relativos a los desplazamientos dentro de la masa de tierra. Los colores amarillos y rojos indican las deformaciones mayores a 2 centímetros	41
Figura 24. Malla de elementos finitos deformada, despues de un periodo de un mes de lluvias	41
Figura 25. Modelo de falla del talud después de un mes de lluvias	42
Figura 26. Calculo del factor de seguridad después de un mes de lluvias $F.S=1,70$.	42
Figura 27. Malla de elementos finitos deformada	43
Figura 28. Modelo de la falla del talud	43
Figura 29. Factor de seguridad después de dos meses de lluvias $F.S=1,604$	44
Figura 30. Factor de seguridad antes de las lluvias $F.S=1,884$, después de un mes de lluvias $F.S=1,70$ y después de dos meses $F.S=1,604$	45
Figura 31 Geometría y estratigrafía del modelo	46
Figura 32. Modelo de la superficie de falla por Slope/W, en tiempo igual a cero.	47
Figura 33. Modelo de la superficie de falla por Slope/W, después de un mes de lluvias.	48
Figura 34. Modelo de la superficie de falla por Slope/W, después de dos meses de lluvias.	48

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Caracterización del movimiento	27
Tabla 2. Factores de seguridad básicos mínimos (FSBM).	29
Tabla 3. Parámetros del suelo utilizados en el modelo esfuerzo-deformación	31
Tabla 4. Parámetros del suelo utilizados en el modelo esfuerzo-deformación	36
Tabla 5 Datos de precipitación del mes de octubre de octubre de 2014 utilizados para el modelo de esfuerzo deformación.	39
Tabla 6. Datos de precipitación del mes de Noviembre de 2014 utilizados para el modelo de esfuerzo-deformación.	40
Tabla 7. Parámetros del suelo utilizados en el modelo de Equilibrio limite.	46
Tabla 8. Factores de seguridad obtenidos	47
Tabla 9. Factores de seguridad obtenidos al transcurrir un mes de lluvias.	48
Tabla 10. Factores de seguridad obtenidos al transcurrir dos meses de lluvias.	49

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LAS PRECIPITACIONES EN LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES MEDIANTE METODOS COMPUTACIONALES^{*}

AUTORES: LUIS FERNANDO CASTRO POLO
JORGE ARMANDO RAMÓN MEZA^{**}

PALABRAS CLAVE: Estabilidad de taludes, derrumbes, factor de seguridad, equilibrio limite, elementos finitos.

DESCRIPCIÓN:

En la siguiente investigación se pretende conocer un poco más acerca de los efectos que puede causar una determinada intensidad de lluvia sobre un talud o ladera; estas precipitaciones pueden ser causa de falla en cualquier talud, aún más en las zonas tropicales en donde la intensidad anual es mayor, y la presencia de derrumbes se hace más frecuente; por tal razón es necesario comprender los efectos causados internamente por las lluvias en el talud, para reducir el riesgo de posibles deslizamientos y minimizar los niveles de amenaza. Para ello se realizó un estudio previo del talud para conocer su mecanismo de falla antes y después de dicha precipitación.

Dentro de la investigación, que es un ítem indispensable para proponer alternativas de prevención, control o estabilización, se determinó un factor de seguridad, para establecer las condiciones de estabilidad del talud. Este se obtuvo mediante métodos matemáticos, los cuales tienen en cuenta la mayoría de factores que inciden en la falla. Hoy en día los avances en la informática nos permiten integrar estas variables en un modelo representativo del problema, que fácilmente puede ser ajustado, teniendo en cuenta condiciones iniciales según el caso. El factor de seguridad del talud, puede ser determinado mediante el método de elementos finitos, o por medio del método de equilibrio límite. Estas técnicas involucran parámetros de resistencia del suelo, como el ángulo de fricción interna, la cohesión y el peso específico entre otros datos, importantes para realizar un análisis de comportamiento de este.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela de Ingeniería Civil Director Wilfredo Deltoro Rodríguez

ABSTRACT

TÍTULO: ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LAS PRECIPITACIONES EN LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES MEDIANTE METODOS COMPUTACIONALES^{*}

AUTORES: LUIS FERNANDO CASTRO POLO **
JORGE ARMANDO RAMÓN MEZA **

KEYWORDS: Slope stability, landslides, safety factor, limit equilibrium, finite elements.

The following research aims to learn more about the effects that can cause a certain intensity of rain on a slope or hillside, these rains may cause failure of any slope, even in the tropics where annual intensity It is greater, and the presence of landslides becomes more frequent; for this reason it is necessary to understand the effect caused internally by the rains on the slope, to reduce the risk of possible landslides and minimize the threat levels. To do a preliminary study of the slope is conducted to know the mechanism of failure before and after such precipitation.

Within the research, which is a prerequisite for proposing alternatives to prevent, control or stabilization item, a safety factor was determined to establish the conditions of stability of the slope. This was obtained by mathematical methods, which take into account most factors affecting failure. Today, advances in computer allow us to integrate these variables in a representative model of the problem, which can easily be adjusted, taking into account initial conditions as appropriate. The safety factor of the slope can be determined by the finite element method, or by the method of limit equilibrium. These techniques involve soil strength parameters such as the angle of internal friction, cohesion and specific gravity and other data important for analysis of this behavior.

* Project of grade

** Faculty of engineering physical-mechanical School of Civil Engineering Director Wilfredo Deltoro Rodríguez

INTRODUCCIÓN

Nuestro medio ambiente es un conjunto de ecosistemas ricos en biodiversidad, lleno de vegetación, montañas y demás, se ve afectado a veces por fenómenos que no podemos controlar, ni podemos entender del todo, y que a pesar de hacer parte de este mundo natural, contribuyen a que se produzcan desastres naturales, que amenazan con interrumpir o causar un daño en la vida que existe en este.

Al ser indomable y basta en todo su sentido, la naturaleza es en gran parte difícil de controlar, pero sin embargo, además de brindarnos nutrientes para poder vivir, nos entrega fenómenos como las lluvias o precipitaciones, cuyas intensidades y duraciones son medidas por el hombre para su análisis. Esto consiste en organizar, interpretar y modelar todos estos datos, para así generar ideas que lleven a dar solución a fenómenos como son los deslizamientos, que se originan en su mayoría en los taludes y laderas.

Los efectos que producen las lluvias, son causa de falla en cualquier tipo terreno y aún más en las zonas tropicales en donde la precipitación anual es mayor, y la presencia de derrumbes se hace más frecuente. Por tal razón el ser humano, en su lucha por hacerle frente a este problema y utilizando su capacidad de ingenio, ha creado metodologías y herramientas que impulsan su avance por adaptarse a estos sucesos.

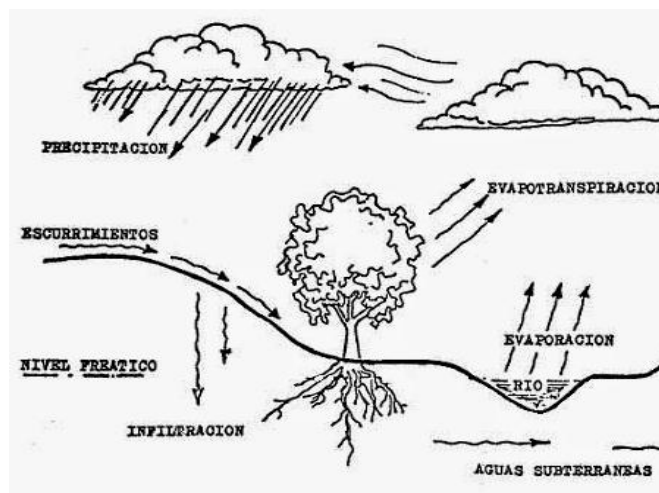
La presencia de estos fenómenos naturales no dejara de ser un reto para la ingeniería, por tal razón la utilización de métodos matemáticos, como los fundamentados en las teorías de los Elementos Finitos y Equilibrio Limite, facilitara el análisis y a la comprensión de este problema. La razón por la cual se

recurre a estos métodos, es porque hoy en día, los avances en la informática, permiten modelarlos mediante softwares como Plaxis 2D y Slope/W. Estos programas pueden relacionar distintas variables en un modelo representativo del problema, para posteriormente realizar una interpretación de los resultados, los cuales permitirán, plantear soluciones y alternativas viables para la corrección, estabilización y prevención de los deslizamientos.

1. EFECTOS DE LAS PRECIPITACIONES EN LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES

Los efectos que producen las lluvias, son causa de falla en cualquier tipo de terreno, ya sea si esta cae sobre la superficie de un talud o una ladera, y aún más si estos se encuentran en zonas tropicales en donde la precipitación anual es mayor, y la presencia de derrumbes se hace más frecuente después de un periodo de tiempo, y una determinada intensidad de lluvia. El proceso que conlleva a un deslizamiento se conoce como el ciclo hidrológico del talud, el cual lo conforman la precipitación, la evapotranspiración, la escorrentía, la infiltración, el cambio en humedad del suelo y la acumulación de agua subterránea en los acuíferos. Todos estos sucesos, se van llevando a cabo a medida que pasa el tiempo, debilitando la estructura interna del talud y posteriormente provocando la falla de este.

Figura 1. Ciclo hidrológico:



Fuente: CIVIL GEEKS Proyecto agua potable antecedentes históricos [en línea] disponible en: <http://civilgeeks.com/2010/09/22/proyecto-agua-potable-antecedentes-historicos/> [citado 10 de Octubre de 2015].

En este ciclo los factores que predominan antes de la falla son, la precipitación, la escorrentía y la infiltración.

1.1 PRECIPITACIÓN

La precipitación es el factor detonante en el estudio acerca de los deslizamientos y de las fallas que suceden en un talud, puesto que este tiene una influencia directa en la infiltración y en nivel freático. Este volumen de agua que cae sobre un área en forma de lluvia en un periodo de tiempo, tiene una intensidad que se puede interpretar y organizar como datos, mediante instrumentos que se emplean en las estaciones meteorológicas. Estos instrumentos se conocen como el Pluviómetro y el Pluviógrafo, los cuales miden las precipitaciones en milímetros, que sería el espesor de la lámina de agua que se formaría en una superficie plana en un tiempo determinado.

1.2 INFILTRACIÓN

La infiltración es el proceso en el cual el agua entra al terreno por medio de los poros o grietas que tenga esta masa de tierra, y está en función del tipo de suelo, de la pendiente superficial, del tipo de vegetación, de la cantidad y el ritmo en que cae la lluvia, entre más caiga menos penetrara el agua, ya que esta saturara la superficie del terreno, al contrario entre más lenta sea la precipitación, la infiltración aumentara y habrá menos escorrentía.

Una mayor infiltración producirá un aumento en la presión de poros interna del talud, debilitándolo y generando su falla.

Figura 2. Deslizamiento de tierra, a causa del invierno en la vía Medellín – Santa Fe, en el sector de las Meloneras



Fuente: COLOMBIA Tres vías estarán cerradas durante festejos navideños [en línea] disponible en: <http://www.colombia.com/actualidad/nacionales/sdi/27889/tres-vias-estaran-cerradas-durantes-festejos-navidenos> [Citado 14 de Octubre de 2015].

1.3 ESCORRENTÍA

La escorrentía sucede cuando la lluvia es muy intensa lo que ocasiona una saturación de la superficie del talud, causando que la infiltración disminuya, permitiendo que el agua fluya sobre este. Este factor al igual que la infiltración depende de la permeabilidad del suelo, de la pendiente superficial, de la intensidad de lluvia y de la cobertura vegetal.

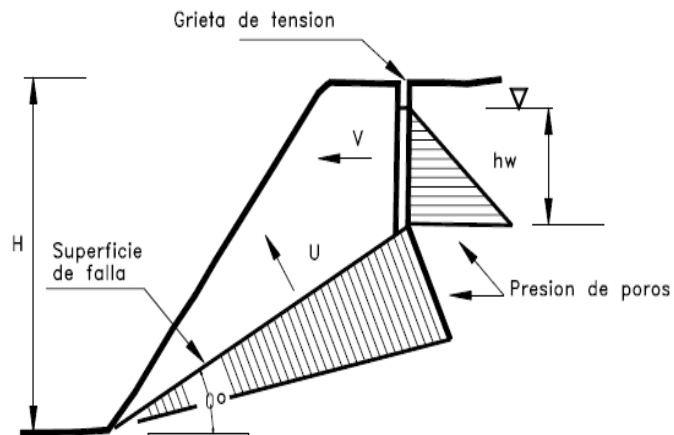
Algunos de los efectos causados por las lluvias y que más influyen en el deslizamiento de un talud son, el aumento en presión de poros y la erosión.

1.4 PRESIÓN DE POROS

La presión de poros se define como la presión que ejerce un fluido en los espacios porosos de la masa de tierra.

El aumento en la presión de poros, puede ocurrir de una manera lenta o rápida, de acuerdo a la duración e intensidad de la lluvia, al tipo de suelo que se encuentra en el área, y está en función de su permeabilidad o rata de infiltración. Además es un efecto que provoca la reducción de la resistencia al cortante afectando la estabilidad del talud, por disminución de los esfuerzos efectivos.

Figura 3. Presión hidrostática sobre una superficie de falla inminente



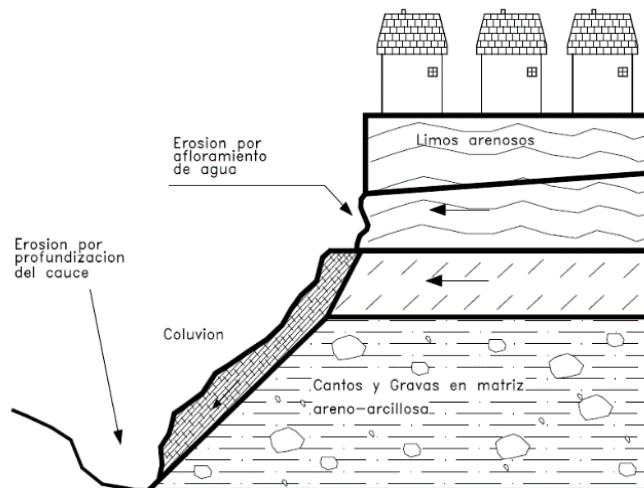
Fuente: SUAREZ DÍAZ, Jaime Deslizamiento y Estabilidad de taludes en zonas tropicales. 1998

La presión de poros está asociada con la localización del nivel freático y los acuíferos, y se puede medir y monitorear utilizando piezómetros abiertos o neumáticos.

1.5 EROSIÓN

Este fenómeno es producido por la velocidad del agua que escurre sobre la superficie del talud, ocasionando un desprendimiento y un transporte de los materiales que se encuentran en la superficie de este. También sucede cuando el agua subterránea aflora a la superficie del terreno, esto puede producir el desprendimiento de las partículas del suelo generando cárcavas. Cuando en el avance de una cárcava de erosión subsuperficial ésta captura un contacto con afloramiento de agua subterránea éste contacto trata de ampliarse en un proceso de deslizamientos laterales progresivos [1].

Figura 4. Erosión por afloramiento de agua subterránea.



Fuente: SUAREZ DÍAZ, Jaime Deslizamiento y Estabilidad de taludes en zonas tropicales. 1998

1.6 CONTROL Y PREVENCIÓN DE LOS DESLIZAMIENTOS A CAUSA DE LAS LLUVIAS.

Antes de plantear una alternativa viable de estabilización o control de erosión, se realizará un estudio detallado y organizado de las causas y los mecanismos de falla del talud.

1.7 IDENTIFICACIÓN DEL SITIO

El talud en estudio está ubicado en el sector sur-oriental de la ciudad de Bucaramanga, cercano al viaducto de Neomundo.

1.7.1 Litología general De acuerdo al estudio de Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del área metropolitana de Bucaramanga realizado por Ingeominas, el lote está localizado geológicamente sobre el Miembro Limos Rojos (Qblr). Nivel definido por Julivert (1963).

Geológicamente, el talud en estudio se encuentra localizado sobre el miembro Limos Rojos (Qblr), definido por Julivert en 1963, en la meseta de Bucaramanga.

Geomorfológicamente este Miembro constituye lo que anteriormente se denominaba como “Meseta de Bucaramanga”, con relieve semiplano y pendientes entre 2 y 7%; el drenaje es escaso paralelo y superficial. Está constituido por arenas arcillosas gravosas y limos arcillosos de colores rojizos, amarillentos y naranjas.

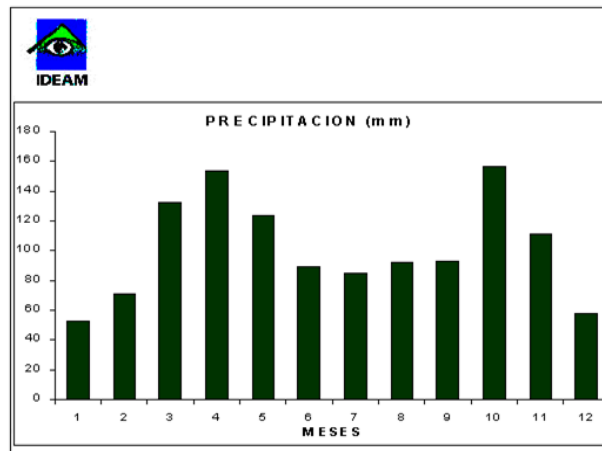
Se observa la presencia esporádica de bloques angulares de arenisca asociados superficialmente a este miembro; estos cantos pueden estar embebidos dentro de limos rojos y se caracterizan por estar meteorizados. Suprayace al segmento gravoso y su contacto con éste es gradacional.

La parte más superficial de este Miembro se encuentra altamente meteorizada, formándose en algunos sectores niveles de oxidación que le ayudan a incrementar su compactación y resistencia a la erosión. El ambiente de depositación indica un dominio de flujo de lodos combinados con caídas de bloques de la pendiente del macizo.

Los suelos del talud corresponden a arenas arcillosas de permeabilidad moderada y baja cohesión.

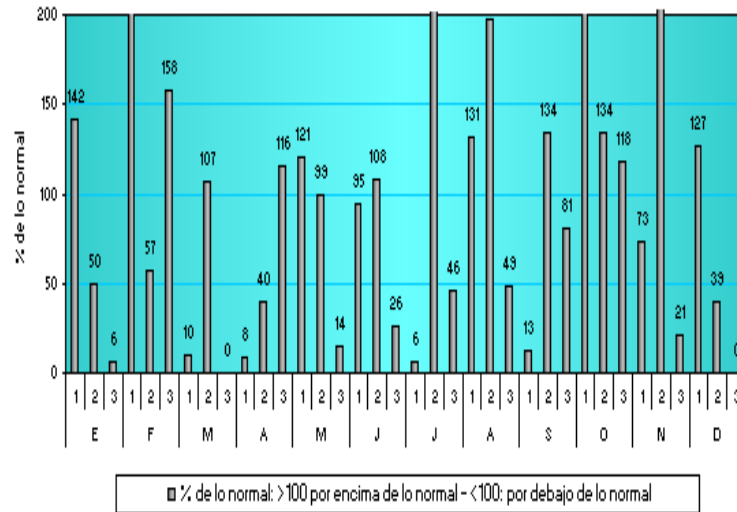
1.7.2 Clima e hidrología Bucaramanga, capital de Santander, está situado al noreste del país sobre la cordillera oriental, rama de la cordillera de los andes, a orillas del río de Oro, tiene una temperatura media de 23°C y su precipitación media anual es de 1,041 mm. Existen dos épocas lluviosas, entre Marzo-Mayo y Septiembre-Noviembre. Los meses secos del año son Diciembre y Enero.

Figura 5. Carta climatológica medias mensuales Aeropuerto Palonegro Bucaramanga.



Fuente: Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (IDEAM)

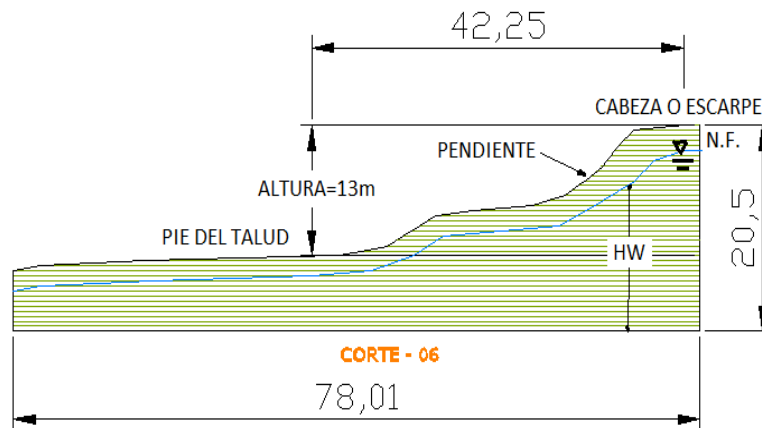
Figura 6. Seguimiento de Precipitación Decadal, anomalía de lluvia Decadal, Aeropuerto Palonegro Bucaramanga, Diciembre 2014



Fuente: Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)

1.7.3 Topografía El perfil del talud en estudio tiene una pendiente 4/5H: 1V, y una altura de 13 metros.

Figura 7. Conformación del perfil del talud y del nivel freático



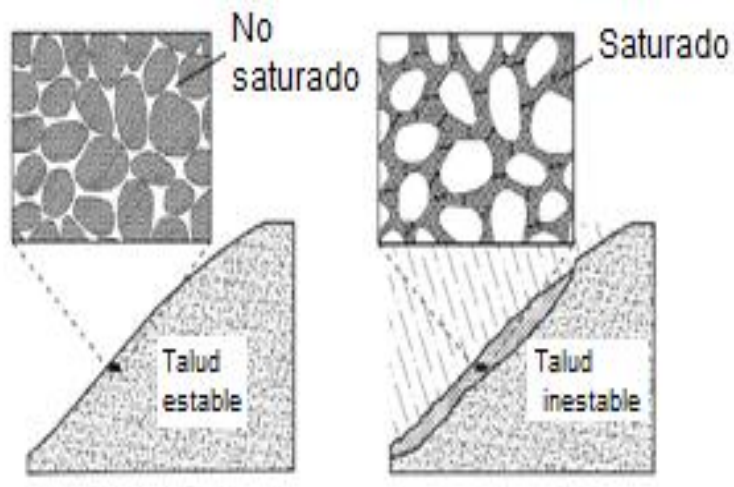
HW: Altura del nivel freático

N.F.: Nivel Freático

1.8 TIPO DE FALLA ESPERADO

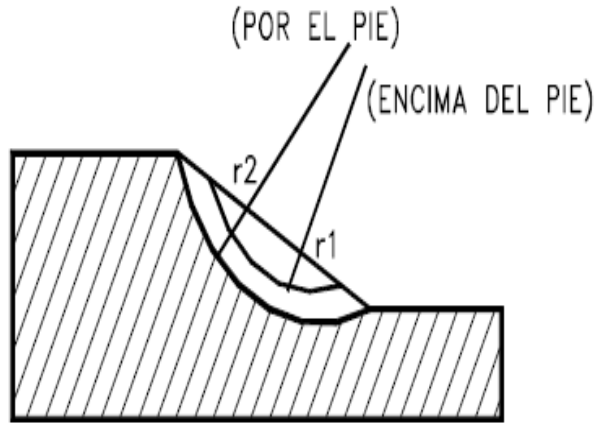
De acuerdo con la litología y características del talud, se espera que pueda ocurrir falla de tipo rotacional, que consiste en un movimiento de rotación típico de una gran masa de material sobre una superficie de falla curva, cuyo centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad de esta. Una de las causas de falla se da por la saturación, debido a un régimen de lluvias que cae sobre el talud, lo cual aumenta la presión de poros debilitando internamente la fricción entre sus partículas.

Figura 8. Aumento de presión de poros en el talud a causa de las lluvias.



Fuente: SUAREZ DÍAZ, Jaime Deslizamiento y Estabilidad de taludes en zonas tropicales. 1998

Figura 9. Efectos de la estructura en la formación de deslizamientos a rotación.



Fuente: SUAREZ DÍAZ, Jaime Deslizamiento y Estabilidad de taludes en zonas tropicales. 1998

Tabla 1. Caracterización del movimiento

Tipo de material	Tierra
Humedad	húmedo
Secuencia de repetición	Progresivo: superficie de falla se extiende en la dirección del movimiento.
Velocidad del movimiento	Semi rápido
Estilo	Sencillo: un solo movimiento
Estado de actividad	inactivo

2. METODOLOGÍA

Como primera instancia se hará un análisis de la estabilidad del talud, antes de un periodo de lluvias, para obtener un factor de seguridad inicial; segundo se realizara el modelo del talud después de uno y dos meses de lluvias, y se comparan los resultados del modelo en Plaxis 2D, con los factores de seguridad calculados en el software Slope/W.

2.1 PLANTEAMIENTO DEL MODELO DEL PROBLEMA

Para el análisis se hará uso de métodos computacionales, los cuales nos ayudaran a describir el modo de falla del talud en estudio. Esto se realizara por medio del software (PLAXIS 2D), que se basa en la teoría de elementos finitos y por software (SLOPE/W) que se fundamenta en la teoría de equilibrio límite; además se calculara el factor de seguridad del talud, para así determinar qué tan estable es antes y después de la aplicación del régimen de lluvias.

2.2 FACTOR DE SEGURIDAD

Se define como la relación entre todas las fuerzas que inciden a la falla de cualquier estructura, en este caso las que provocan el deslizamiento de un talud o una ladera en particular, y las fuerzas que resisten e impiden a que falle dicha estructura. La relación entre estas variables no debe ser menor que la unidad o no menor a los valores de factor de seguridad presentados en la tabla H.2.4-1. Por consiguiente estas fuerzas deben estar en equilibrio para que no se produzca un movimiento.

$$F.S = \frac{\Sigma FUERZAS RESISTENTES}{\Sigma FUERZAS ACTUENTES} \geq 1.0 \quad (1)$$

Tabla 2. Factores de seguridad básicos mínimos (FSBM).

Condición	FSBM	
	Diseño	Construcción
Carga Muerta + Carga Viva Normal	1,5	1,25
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	1,25	1,1
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo estático	1,1	1
Taludes – Condición Estática y Agua Subterránea Normal	1,5	1,25
Taludes – Condición Seudo-estática con Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de Diseño	1,05	1

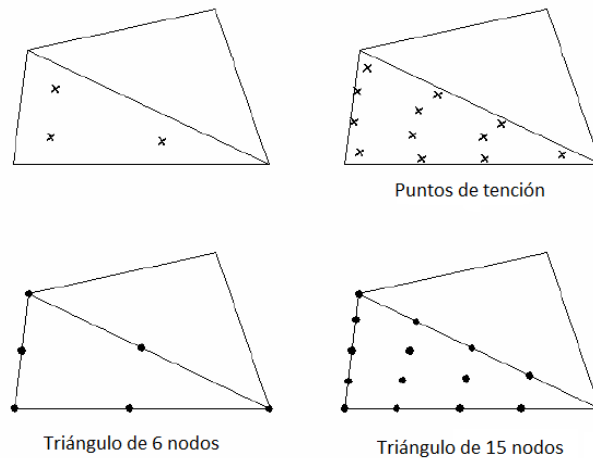
Fuente: Norma Sismo Resistente del año 2010, Título H, tabla. H.2.4-1.

2.3 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Este método numérico, tiene una amplia aplicación en el campo de la ingeniería, para la solución de problemas que involucran un alto grado de complejidad. Para este estudio se aplicará en el área de la geotecnia, específicamente al estudio de la estabilidad de los taludes, analizando los esfuerzos y las deformaciones que pueden ocurrir internamente.

La teoría de elementos finitos, consiste en subdividir la masa de tierra en pequeños elementos unidos por nodos; cada nodo posee un número de grados de libertad. De esta forma es posible pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), a uno con grados de libertad finito.

Figura 10. Posición de los nodos y los puntos de tensión en elementos de suelo.

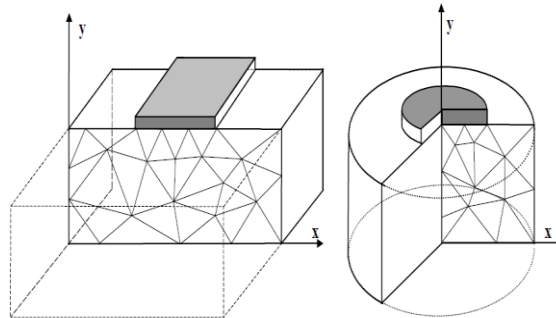


Fuente: Plaxis Version 8, Manual de referencia

2.3.1 Software Plaxis PLAXIS puede ser utilizada para llevar a cabo análisis de elementos finitos en dos dimensiones. Los modelos de elementos finitos pueden ser de deformación plana (*Plane strain*) o Axisimétricos (*Axisymmetric*). El modelo de Deformación plana se utiliza en el caso de geometrías con una sección transversal (más o menos) uniforme para las que pueda suponerse que los correspondientes estados tensionales y de cargas son uniformes a lo largo de una determinada longitud perpendicular a la sección

transversal, y el modelo axisimétrico se utiliza en estructuras circulares con una sección transversal radial (más o menos) uniforme y un esquema de carga alrededor del eje central que permita suponer estados tenso-deformacionales idénticos en cualquier dirección radial. [2]

Figura 11. Ejemplo de un problema de deformación plana y de uno axisimétrico.



Fuente: Plaxis Version 8, Manual de referencia.

A continuación se realizara un modelo por medio este método para estudiar la estabilidad del talud.

2.4 PERFIL GEOTÉCNICO

El análisis se realizó de acuerdo con el perfil litológico, cuyas propiedades se obtuvieron mediante ensayos de laboratorio y correlaciones, de acuerdo con las características del suelo, las cuales se relacionan en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros del suelo utilizados en el modelo esfuerzo-deformación

ID	1
NOMBRE	Arena arcillosa
TIPO	Drenado
γ_{unsat} [KN/m ³]	17,3
γ_{sat} [KN/m ³]	19,3
Kx [m/dia]	0,0864
Ky [m/dia]	0,0864
V	0,3
Eref [KN/m ²]	33500
Cref [KN/m ²]	11
Φ' phi [°]	35

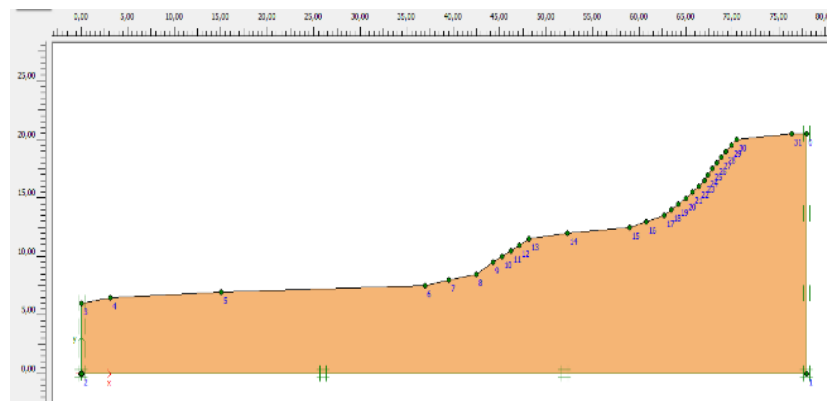
2.5 ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DEL TALUD ANTES DE LA APLICACIÓN DEL RÉGIMEN DE LLUVIAS

Para este primer análisis, se realizara el modelo sin la aplicación del régimen de lluvias.

2.5.1 Características del modelo PLAXIS admite diversos modelos constitutivos para simular el comportamiento del suelo y de otros medios continuos. Los modelos y sus parámetros se analizan en detalle en el manual de Modelos de los Materiales. [2]

Para este análisis se empleó el criterio de falla de Mohr-Coulomb; este puede ser considerado como una aproximación de primer orden al comportamiento real del suelo. Este modelo elástico perfectamente plástico exige cinco parámetros de entrada básicos, a saber: un módulo de Young, E , un coeficiente de Poisson, ν , una cohesión, c , un ángulo de fricción, ϕ , y un ángulo de dilatación, ψ . [3]

Figura 12. Geometría y estratigrafía del modelo

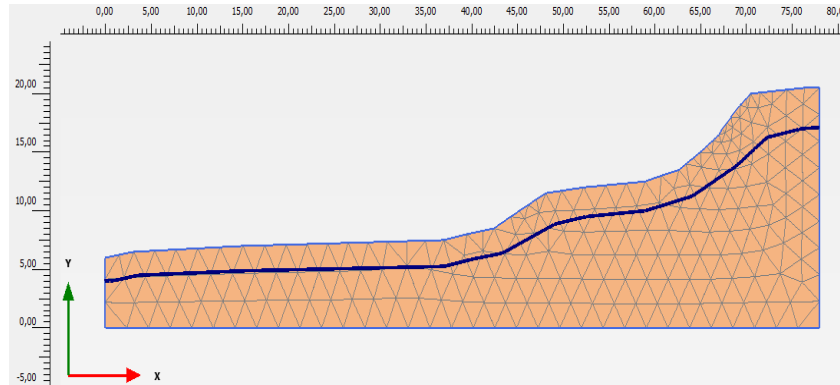


Estrato de suelo: *Arena arcillosa*

2.5.2 Elementos y mallado La geometría o dominio está limitada por un contorno, y se dividió en elementos finitos. Esta descomposición se denomina malla, la cual

se dispuso con elementos triangulares de 15 nodos internos, en donde se le aplico el respectivo método numérico para calcular los esfuerzos y las deformaciones.

Figura 13. Malla de elementos finito



2.5.3 Análisis de resultados

- Los desplazamientos máximos en el modelo son de 0,038480 metros en la corona del talud, como se observa en la figura 11 y 12. Estos son provocados por el peso propio de la masa de tierra.

Figura 14. Malla de elementos finitos deformada

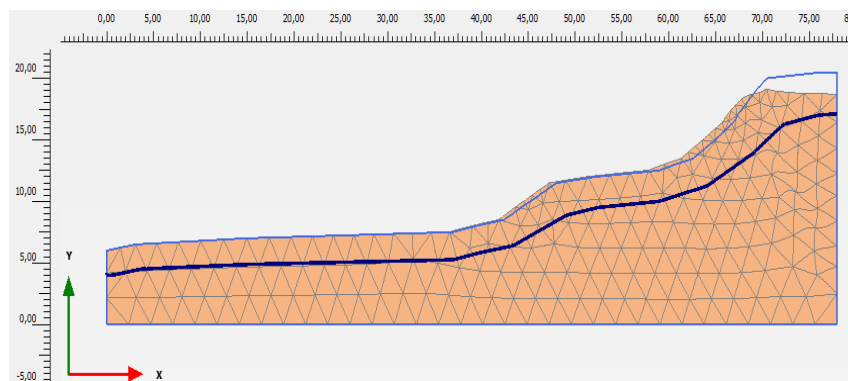


Figura 15. Contornos relativos a los desplazamientos dentro de la masa de tierra. Los colores amarillos y rojos indican las deformaciones mayores a 2 centímetros

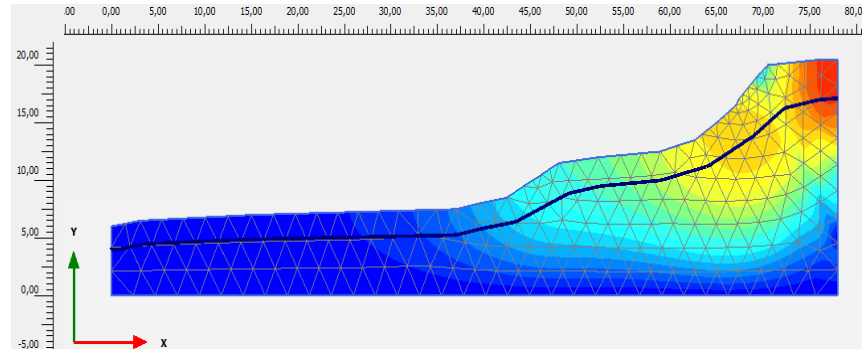
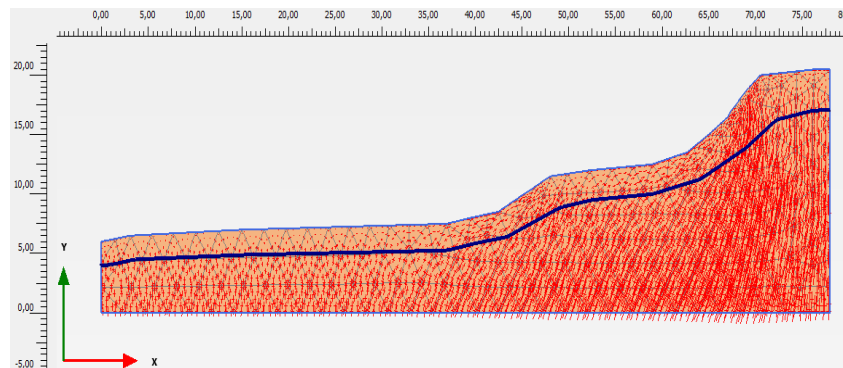


Figura 16. Dirección de los esfuerzos efectivos principales. Valor del esfuerzo principal en la base talud =234,6 KN/m2



- El Factor de seguridad fue determinado mediante la opción *Phi-c reduction*; este consiste en reducir progresivamente los parámetros de resistencia $\tan\phi$ y c del suelo hasta que se produce la rotura de la estructura [5]. Para las condiciones originales del talud se obtiene un factor de seguridad de 1.88, indicando estabilidad.

Figura 17. Modelo de la falla del talud, deslizamiento rotacional típico.

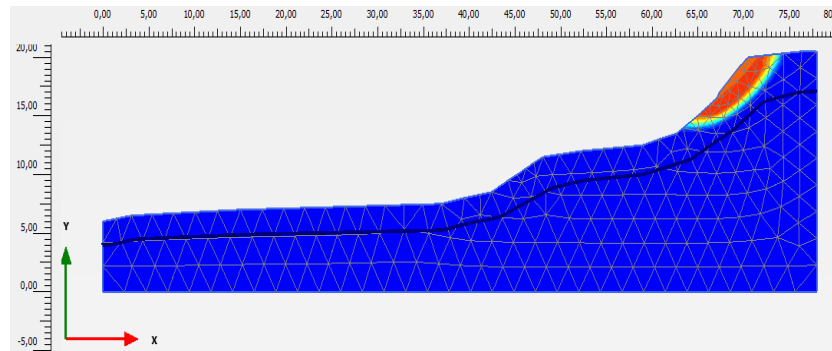
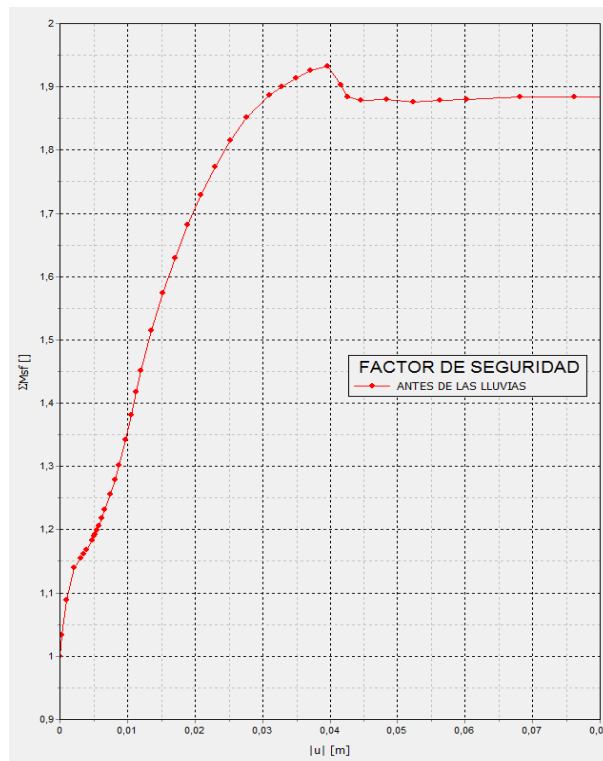


Figura 18. Calculo del factor de seguridad. Valor F.S=1.882.



2.6 ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DEL TALUD, CON APLICACIÓN DE UN RÉGIMEN DE LLUVIAS.

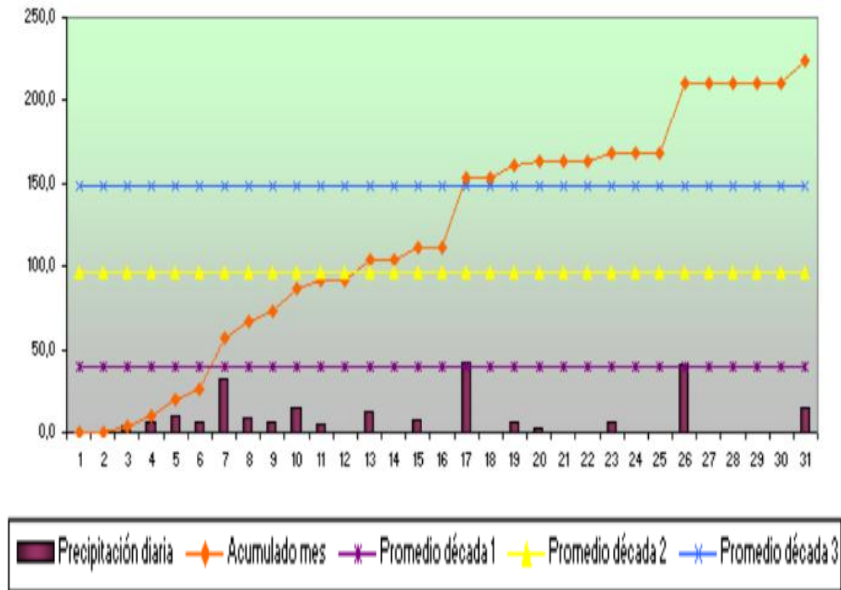
Para este análisis, se realizara el modelo de estabilidad del talud, dentro de un régimen de lluvias.

Tabla 4. Parámetros del suelo utilizados en el modelo esfuerzo-deformación

ID	1
NOMBRE	Arena arcillosa
TIPO	Drenado
γ_{unsat} [KN/m ³]	17,3
γ_{sat} [KN/m ³]	19,3
Kx [m/dia]	0,0864
Ky [m/dia]	0,0864
V	0,3
Eref [KN/m ²]	33500
Cref [KN/m ²]	11
Φ' phi [°]	35

2.6.1 Régimen de lluvias Para análisis de la estabilidad del talud nos ubicaremos en la ciudad de Bucaramanga, la cual cuenta con un régimen de lluvias, dividido en dos épocas lluviosas, entre Marzo-Mayo y Septiembre-Noviembre. Los meses secos del año son Diciembre y Enero. Los meses tomados como ejemplo para el análisis fueron los meses de octubre y noviembre.

Figura 19. Seguimiento de lluvia diaria [mm], Octubre de 2014.



Fuente: Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Figura 20. Modelo de Seguimiento de lluvia diaria Octubre de 2014 en Plaxis 2D.

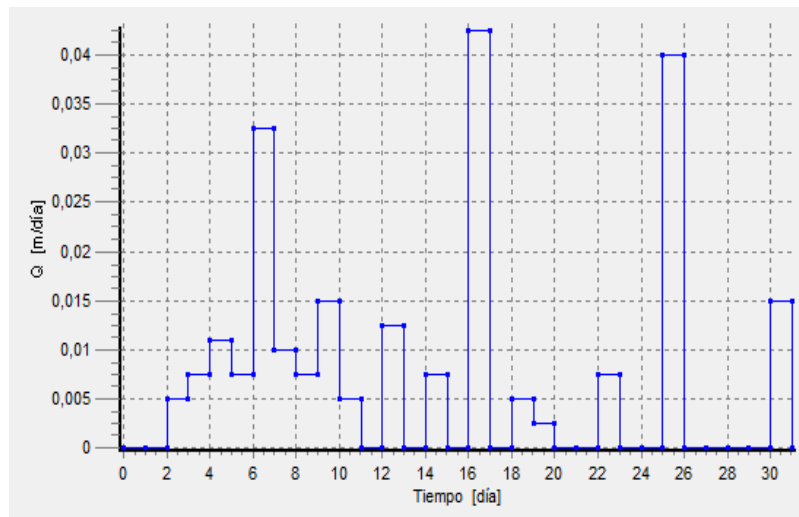
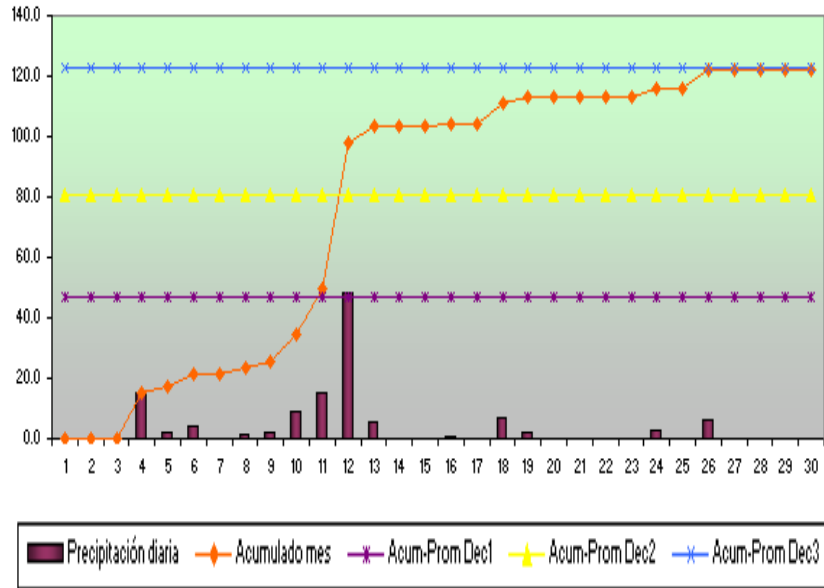


Figura 21. Seguimiento de lluvia diaria [mm], Noviembre de 2014.



Fuente: Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Figura 22. Modelo de Seguimiento de lluvia diaria Noviembre de 2014 en Plaxis 2D

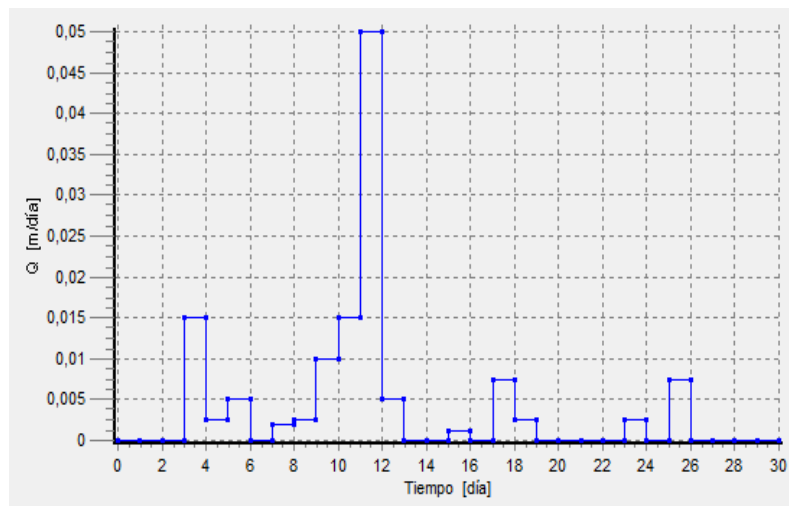


Tabla 5 Datos de precipitación del mes de octubre de octubre de 2014 utilizados para el modelo de esfuerzo deformación.

Tiempo [Dia]	P[m/dia]	Tiempo [Dia]	P[m/dia]
0	0	16	0
1	0	16	0.0425
1	0	17	0.0425
2	0	17	0
2	0.005	18	0
3	0.005	18	0.005
3	0.0075	19	0.005
4	0.0075	19	0.0025
4	0.011	20	0.0025
5	0.011	20	0
5	0.0075	21	0
6	0.0075	21	0
6	0.0325	22	0
7	0.0325	22	0.0075
7	0.01	23	0.0075
8	0.01	23	0
8	0.0075	24	0
9	0.0075	24	0
9	0.015	25	0
10	0.015	25	0.04
10	0.005	26	0.04
11	0.005	26	0
11	0	27	0
12	0	27	0
12	0.0125	28	0
13	0.0125	28	0
13	0	29	0
14	0	29	0
14	0.0075	30	0
15	0.0075	30	0.015
15	0	31	0.015
		31	0

Tabla 6. Datos de precipitación del mes de Noviembre de 2014 utilizados para el modelo de esfuerzo-deformación.

Tiempo [Dia]	P[m/Dia]	Tiempo [Dia]	P[m/Dia]
0	0	15	0.00125
1	0	16	0.00125
1	0	16	0
2	0	17	0
2	0	17	0.0075
3	0	18	0.0075
3	0.015	18	0.0025
4	0.015	19	0.0025
4	0.0025	19	0
5	0.0025	20	0
5	0.005	20	0
6	0.005	21	0
6	0	21	0
7	0	22	0
7	0.002	22	0
8	0.002	23	0
8	0.0025	23	0.0025
9	0.0025	24	0.0025
9	0.01	24	0
10	0.01	25	0
10	0.015	25	0.0075
11	0.015	26	0.0075
11	0.05	26	0
12	0.05	27	0
12	0.005	27	0
13	0.005	28	0
13	0	28	0
14	0	29	0
14	0	29	0
15	0	30	0
		30	0

2.6.2 Análisis de resultados después de un mes de lluvias El periodo de lluvias utilizado en este caso fue el mes de octubre de 2014.

- Se puede observar un aumento en el nivel freático, y los desplazamientos calculados se encuentran alrededor de 0.03328 metros, como se observa en las figuras 23 y 24. Estos desplazamientos son provocados por el peso propio de la masa de tierra.

Figura 23. Contornos relativos a los desplazamientos dentro de la masa de tierra. Los colores amarillos y rojos indican las deformaciones mayores a 2 centímetros

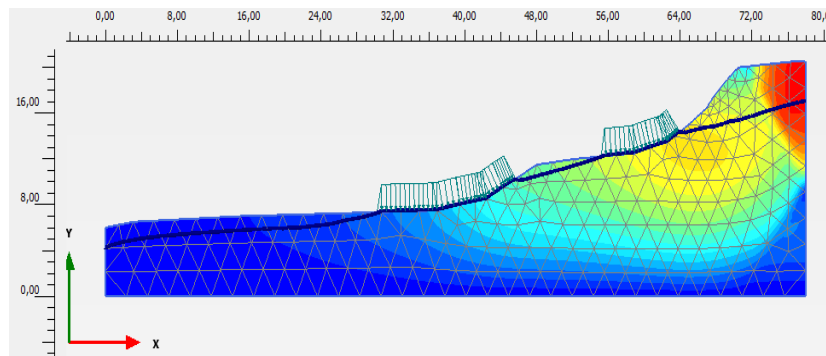
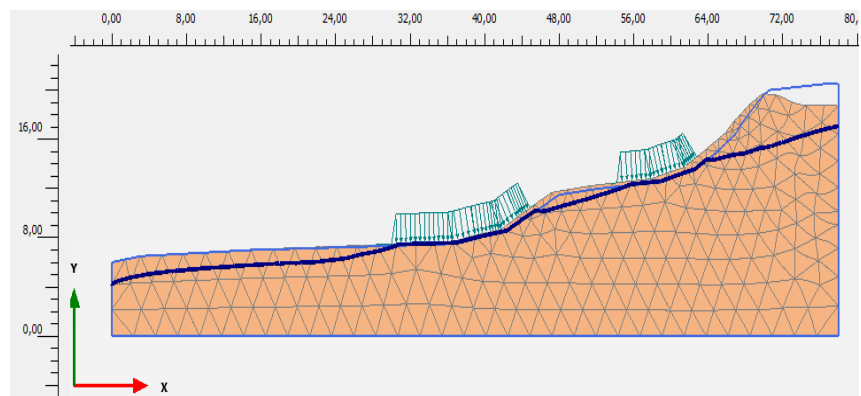


Figura 24. Malla de elementos finitos deformada, después de un periodo de un mes de lluvias



- El factor de seguridad después de un mes de lluvias presenta una disminución, por causa del aumento en la presión de poros.

Figura 25. Modelo de falla del talud después de un mes de lluvias

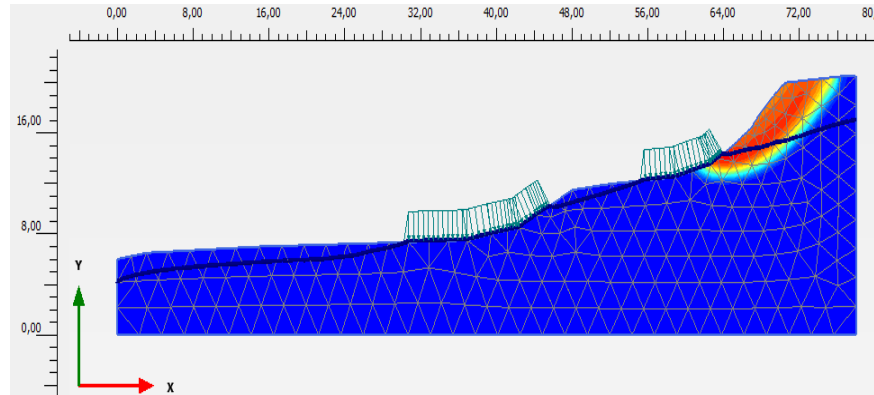
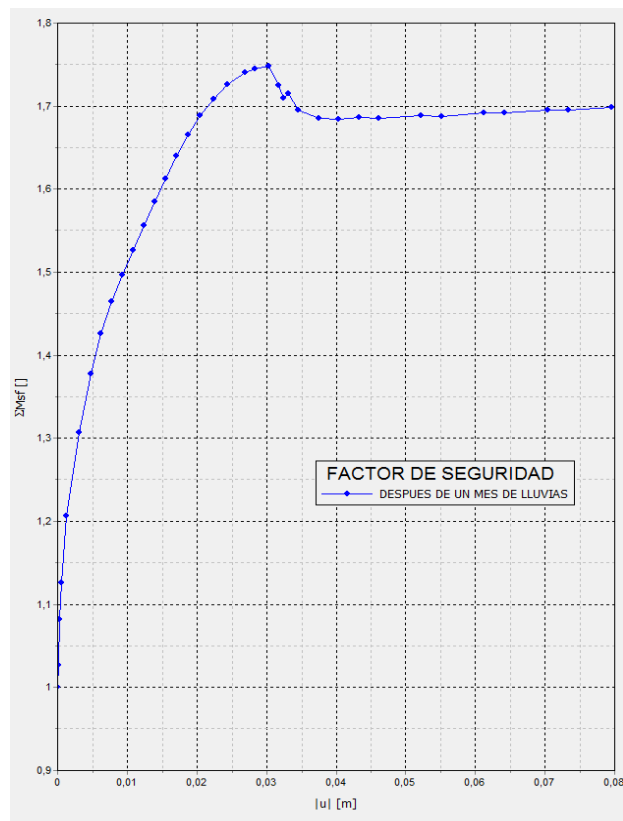


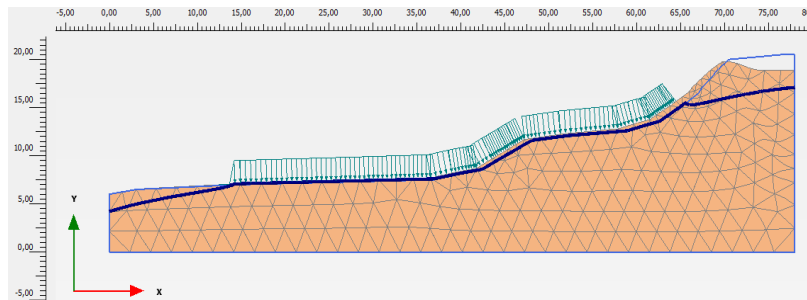
Figura 26. Calculo del factor de seguridad después de un mes de lluvias F.S=1,70.



2.6.3 Análisis de resultados después de dos meses de lluvias En este análisis se le aplicó al talud, un régimen de lluvias de dos meses: el mes de octubre y de noviembre.

- Después de dos meses se puede observar un aumento progresivo del nivel freático, y los desplazamientos calculados se encuentran alrededor de 0.0329 metros, como se observan en las figuras 11.

Figura 27. Malla de elementos finitos deformada



- El Factor de seguridad disminuye progresivamente a medida que transcurren dos meses de lluvias. Lo que indica que es inversamente proporcional al tiempo, en qué cae la lluvia

Figura 28. Modelo de la falla del talud

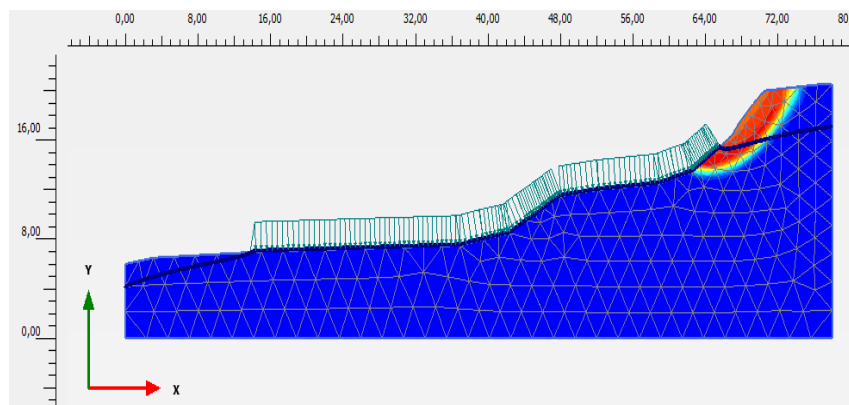
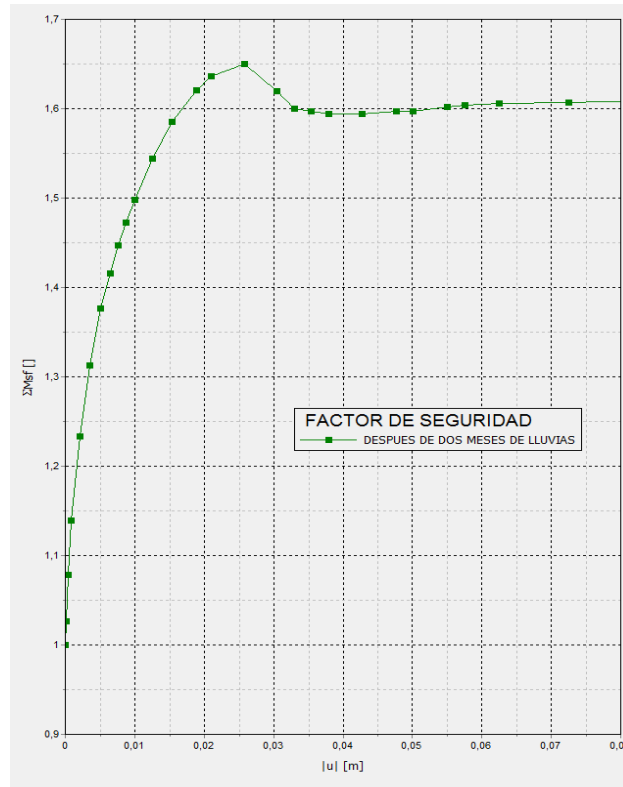
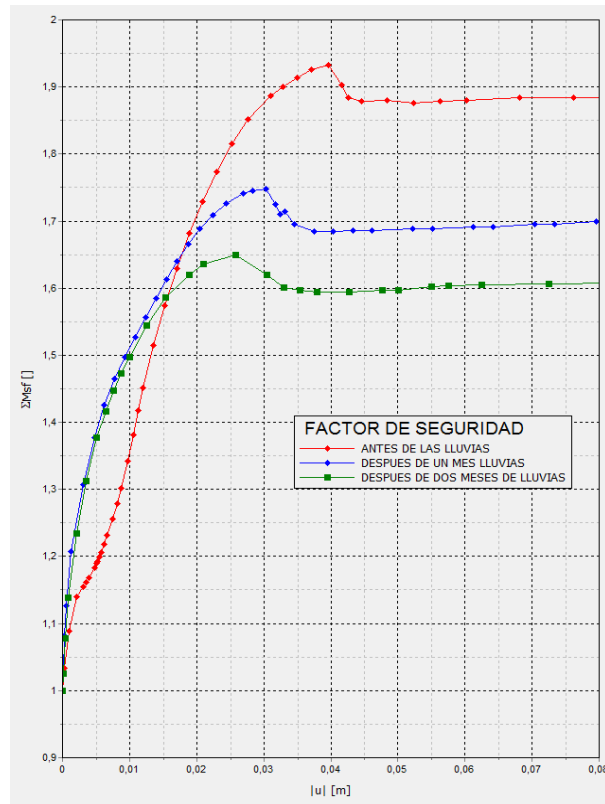


Figura 29. Factor de seguridad después de dos meses de lluvias F.S=1,604



2.6.4 Resumen de resultados Los Factores de seguridad obtenidos, fueron disminuyendo después de uno y dos meses de lluvias. El aumento en el nivel freático, causa una elevación en la presión de poros, lo que debilita la estructura interna del talud.

Figura 30. Factor de seguridad antes de las lluvias F.S=1,884, después de un mes de lluvias F.S=1,70 y después de dos meses F.S=1,604



2.7 MÉTODO DE EQUILIBRIO LÍMITE

El método de equilibrio límite, supone que en caso de un colapso las fuerzas que provocan el derrumbe y las que resisten el desplazamiento a lo largo de la superficie de falla son equivalentes a un factor de seguridad de (1,0). Este proceso consiste en dividir la masa de tierra en dovelas o tajadas, para luego relacionar las fuerzas que actúan sobre ellas, como el cortante, la normal, y la fuerza hidrostática ejercida por el nivel freático; esto con el fin de determinar la estabilidad del talud.

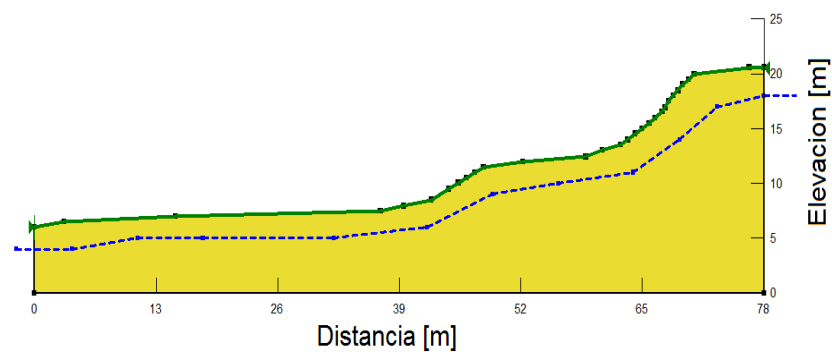
Con el fin de aportar otro punto de vista al estudio de la estabilidad de los taludes, se realizara un análisis en el software Slope/W, en diferentes tiempos: $t = 0$; $t = 31$ días y $t = 61$ días. El modelo se basará en los siguientes métodos para determinar el factor de seguridad.

- Ordinario o de fillenius
- Bishop simplificado
- Janbú simplificado
- Spencer

Tabla 7. Parámetros del suelo utilizados en el modelo de Equilibrio limite.

ID	1
NOMBRE	Arcilla arenosa
TIPO	Drenado
γ_{unsat} [KN/m ³]	17,3
γ_{sat} [KN/m ³]	19,3
Cref [KN/m ²]	11
Φ' phi [°]	35

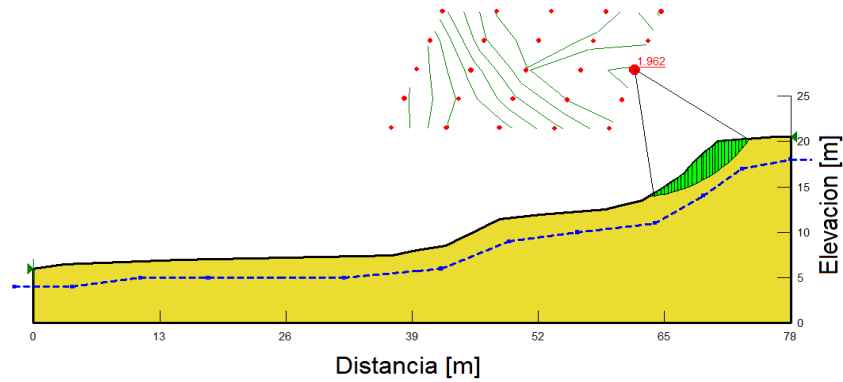
Figura 31 Geometría y estratigrafía del modelo



Estrato de suelo: Arcilla arenosa

2.7.1 Cálculo del Factor de seguridad antes de un periodo de lluvias. En este primer análisis el factor de seguridad se calculó antes de la aplicación de régimen de lluvias.

Figura 32. Modelo de la superficie de falla por Slope/W, en tiempo igual a cero.



Por medio del modelo en el software Slope/W se obtuvo una superficie de falla y los siguientes factores de seguridad críticos.

Tabla 8. Factores de seguridad obtenidos

METODO DE ANALISIS	FACTORES DE SEGURIDAD
Método de Fellenius	1.876
Método de Bishop	1.932
Método de Janbù	1.863
Método de Spencer	1.929

2.7.2 Calculo del Factor de seguridad después de un mes de lluvias. Después de un mes de lluvias se presentó una saturación del talud, provocando la disminución del factor de seguridad, por el aumento en la presión de poros.

Figura 33. Modelo de la superficie de falla por Slope/W, después de un mes de lluvias.

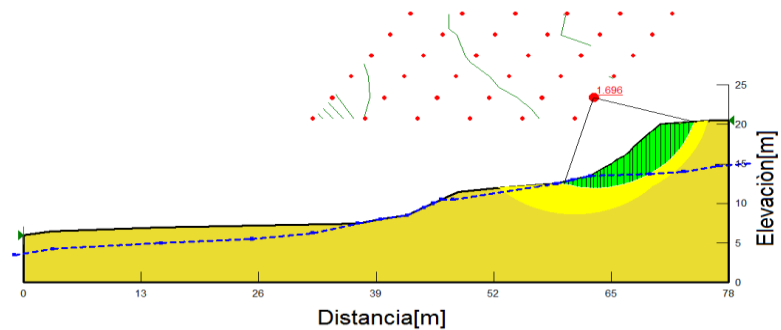


Tabla 9. Factores de seguridad obtenidos al transcurrir un mes de lluvias.

METODO DE ANALISIS	FACTORES DE SEGURIDAD
Método de Fellenius	1.696
Método de Bishop	1.864
Método de Janbù	1.698
Método de Spencer	1.859

2.7.3 Calculo del Factor de seguridad después de dos meses de lluvias. El Factor de seguridad disminuye progresivamente a medida que transcurren dos meses de lluvias.

Figura 34. Modelo de la superficie de falla por Slope/W, después de dos meses de lluvias.

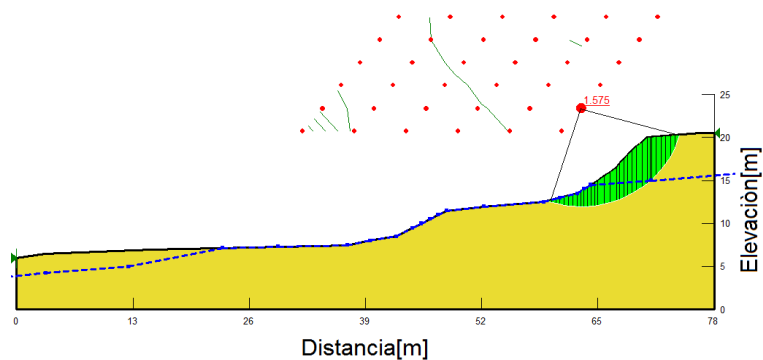


Tabla 10. Factores de seguridad obtenidos al transcurrir dos meses de lluvias.

METODO DE ANALISIS	FACTORES DE SEGURIDAD
Método de Fellenius	1.575
Método de Bishop	1.737
Método de Janbù	1.594
Método de Spencer	1.740

3. CONCLUSIONES

- Los efectos que producen las lluvias en la estabilidad de un talud, es una de las causas potenciales en el proceso de falla, ya sea por el periodo de tiempo y por la intensidad de las precipitaciones que caen sobre el terreno.
- En el estudio realizado, los Factores de seguridad obtenidos, fueron disminuyendo progresivamente, al transcurrir el periodo de lluvias propuestas, a causa de una elevación en la presión de poros, lo que debilita la estructura interna del talud.
- El talud en estudio presento un aumento en el nivel freático, en los dos meses de lluvias aplicados en el modelo, hasta llegar a una saturación de la superficie de este.
- No fue posible evaluar la variación de los parámetros de resistencia con la variación de la humedad y la acción del tiempo, por lo cual se recomienda realizar más investigaciones tendientes a evaluar estos efectos.
- De manera conjunta se realizó el modelo del talud en el software Slope/W, adoptando los niveles freáticos mostrados en Plaxis 2D; en los tiempos $t=0$, $t=31$ días y $t=61$ días. Dando como resultado, unos factores de seguridad cercanos a los calculados con el método de elementos finitos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] Suarez Díaz Jaime, Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales, Instituto de Investigación sobre Erosión y Deslizamientos, 1998, Lluvias, Presión de poros y sus Efectos, pp. 233-272.

[2] Brinkgreve & W.Broere, PLAXIS 2D Manual de Referencia, versión 8, R.B.J. Delft University of Technology & PLAXIS b.v., Países Bajos (2004), *Introduccion de datos y pre-procesador*, pp (3-1), (3-8).

[3] Brinkgreve & W.Broere, PLAXIS 2D Manual de Referencia, versión 8, R.B.J. Delft University of Technology & PLAXIS b.v., Países Bajos (2004), *Introduccion de datos y pre-procesador*, pp (3-1), (3-40).

[4] Brinkgreve & W.Broere, PLAXIS 2D Manual de Referencia, versión 8, R.B.J. Delft University of Technology & PLAXIS b.v., Países Bajos (2004), *Introduccion de datos y pre-procesador*, pp (3-1), (3-37).

[5] Brinkgreve & W.Broere, PLAXIS 2D Manual de Referencia, versión 8, R.B.J. Delft University of Technology & PLAXIS b.v., Países Bajos (2004), *Calculos*, pp (4-1), (4-43).

BIBLIOGRAFÍA

BRINKGREVE & W.BROERE, PLAXIS 2D Manual de Referencia, versión 8, R.B.J. *Delft University of Technology & PLAXIS b.v., Países Bajos Introduccion de datos y pre-procesador, pp (3-1), (3-8). 2004*

BRINKGREVE & W.BROERE, PLAXIS 2D Manual de Referencia, versión 8, R.B.J. *Delft University of Technology & PLAXIS b.v., Países Bajos Introduccion de datos y pre-procesador, pp (3-1), (3-40). 2004*

BRINKGREVE & W.BROERE, PLAXIS 2D Manual de Referencia, versión 8, R.B.J. *Delft University of Technology & PLAXIS b.v., Países Bajos Introduccion de datos y pre-procesador, pp (3-1), (3-37). 2004*

BRINKGREVE & W.BROERE, PLAXIS 2D Manual de Referencia, versión 8, R.B.J. *Delft University of Technology & PLAXIS b.v., Países Bajos Calculos, pp (4-1), (4-43). 2004*

SUAREZ DÍAZ Jaime, Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales, Instituto de Investigación sobre Erosión y Deslizamientos, , Lluvias, Presión de poros y sus Efectos, 1998 pp. 233-272.