

**ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA PROFUNDIDAD DE FALLA DE UN TALUD
VIAL Y LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA**

MARIA CONSUELO NOVA AVENDAÑO

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2017**

**ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA PROFUNDIDAD DE FALLA DE UN TALUD
VIAL Y LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA**

Monografía Investigativa presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Civil

Ing. Esp.Msc EDISON FERNEY GARZÓN
Asesor disciplinar

Mag. Shelley Yohanna Velásquez
Asesor Metodológico

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2017-I**

Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, (17, Abril, 2017)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de estudiar esta carrera, por darme la fortaleza para terminar mi trabajo de grado y mi carrera, a mi familia y amigos por su apoyo incondicional, sus consejos y su comprensión.

A mis asesores, el Ing. Edison Ferney Garzón Montaña y Shelley Yohanna Velásquez, porque me guiaron durante el desarrollo de mi trabajo, quienes con su experiencia y consejos fueron parte importante para terminar esta etapa.

TABLA DE CONTENIDO

1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
2.	ANTECEDENTES	12
3.	JUSTIFICACIÓN	16
4.	OBJETIVOS	19
4.1	OBJETIVO GENERAL.....	19
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
5.	MARCO REFERENCIAL.....	20
5.1.	MARCO CONCEPTUAL.....	20
5.1.1.	Estabilidad de taludes	20
5.1.2.	Factores de los cuales depende la estabilidad de un talud.....	22
5.1.3.	MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES	24
5.1.3.1.	Método de equilibrio límite.....	24
5.1.3.3.	Método de Bishop.....	25
5.1.4.	MÉTODO DE TALUD INFINITO	26
5.1.4.1.	Suelos coluviones.....	30
5.1.5.	RELACIÓN DE PRESIÓN DE POROS (R_u).....	31
Presiones de poros negativas.....		32
5.1.6.	VALORES TÍPICOS DE COHESIÓN ANGULO DE FRICCIÓN Y PESO UNITARIO.....	33
5.2.	MARCO LEGAL.....	34
6.	DISEÑO METODOLÓGICO	37
6.1.	ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	37
6.2.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	37
6.3.	MUESTRA.....	37
6.4.	DEFINICIÓN Y OPERACIÓN DE VARIABLES	38
6.4.1.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE PARÁMETROS	38
6.5.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN ..	39
6.5.1.	Software SLIDE	42
6.6.	FASES DEL PROYECTO.....	42
6.6.1.	Fase 1: Identificación de los parámetros de resistencia para las modelaciones	42



6.6.2. Fase 2: Modelaciones y Elaboración de gráficas, análisis de ecuaciones resistencia normalizada	43
6.6.3. Fase 3: Análisis de Correlaciones	44
6.1. CRONOGRAMA	45
6.2. PRESUPUESTO.....	46
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS	47
7.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA PARA LAS MODELACIONES.	47
7.2. ELABORACIÓN DE GRAFICAS Y ANÁLISIS DE ECUACIONES RESISTENCIA NORMALIZADA	48
8. CONCLUSIONES.....	59
9. RECOMENDACIONES	61
10. REFERENCIAS	62
11. ANEXOS	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Partes de un talud natural.....	21
Figura 2. Ladera natural	21
Figura 3. Talud artificial (corte o relleno)	21
Figura 4. Esquema de fuerzas sobre una dovela en el método de Bishop simplificado ...	25
Figura 5 Diagrama de análisis, método del talud infinito. (cornforth, 2005).....	26
Figura 6 Relación de presión de poros $h/2$ vs Factores de seguridad F	27
Figura 7 Dirección de los esfuerzos principales en la falla de un talud.	28
Figura 8 Definición de la ubicación de napa freática media normalizada	29
Figura 9 Esquema guía general de control de riesgo.....	37
Figura 10 Variables Geométricas.....	38
Figura 11 Formato de recolección de datos	39
Figura 12 Rangos de análisis de sensibilidad	48
Figura 13 Superficies de falla.....	49
Figura 14 Talud $\phi 15$ y $\beta 20$ Ru .10 sin sismo	50
Figura 15 Talud $\phi 15$ y $\beta 40$ Ru .10 sin sismo	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Factores desencadenantes de la inestabilidad de taludes	23
Tabla 2 presiones de suelos	32
Tabla 3 Resumen de Bibliografía tomada para determinar los parámetros Geotécnicos.	33
Tabla 4 Normativa colombiana para taludes	34
Tabla 5 Matriz para condición estática	40
Tabla 6 Matriz para condición pseudoestática	41
Tabla 7 Parámetros definidos para las modelaciones.....	47
Tabla 8 Resumen de rangos máximos y mínimos de los parámetros geo mecánicos.	48
Tabla 9 Resistencia Normalizada ecuación 1. H 3 m., ϕ 15 y β variable.....	52
Tabla 10 Resistencia Normalizada ecuación 1. H 15 m., ϕ 15 y β variable.....	52
Tabla 11 Resistencia Normalizada ecuación 1. H 3 m., ϕ 25 y β variable.....	53

GENERALIDADES

TITULO DEL TRABAJO

ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA PROFUNDIDAD DE FALLA DE UN TALUD
VIAL Y LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

GEOTECNIA

SUBLÍNEA

FUNDAMENTOS DE GEOTECNIA

AUTOR

María Consuelo Nova Avendaño

ASESOR DISCIPLINAR

Ing. Esp. Msc Edison Ferney Garzón

ASESOR METODOLOGICO

Shelley Yohanna Velásquez

LUGAR

BOGOTÀ

AÑO

2017-I

INTRODUCCIÓN

El creciente desarrollo económico del país se ha convertido en la causa principal para mejorar los corredores viales nacionales, sin embargo, la geografía colombiana es todo un desafío para los diseñadores viales y constructores. Por esto se hace necesario realizar una serie de estudios que permitan establecer las condiciones geológicas de las laderas sobre los cuales se trazan las vías y a su vez establecer el comportamiento de los taludes cuando son sometidos a fuerzas externas, las realizaciones de estos estudios representan un gran costo que en muchos casos no es recuperable, dado a que, a pesar de la viabilidad geográfica, el parámetro mecánico del suelo no representa una estabilidad a largo plazo. En este trabajo se propone un método de análisis para taludes viales a media ladera a partir de ecuaciones de resistencia normalizadas y profundidades de fallas.

El comportamiento mecánico de los materiales que conforman una ladera o un talud depende principalmente de su resistencia y de las fuerzas que dan lugar a un estado de esfuerzos. Los cuales provocan unas deformaciones en las estructuras que contienen dichas formaciones de tierra, estas deformaciones no se pueden predecir, sin embargo, relacionar el comportamiento del material en ciertos casos de esfuerzos o en condiciones mecánicas específicas. Esta investigación se lleva a cabo con el fin de establecer posibles diagnósticos de estabilidad de taludes a partir de las configuraciones geométricas y parámetros geotécnicos esenciales, sin necesidad de realizar un análisis detallado con un margen muy pequeño de error.

La metodología empleada en el desarrollo de este trabajo se basa en un análisis retrospectivo de los parámetros geotécnicos de suelos coluviales, a partir de los datos recolectados de las investigaciones, artículos, trabajos de grado que se han desarrollado sobre el tema a trabajar, posteriormente se plantean realizar las modelaciones en slide, variando las geometrías y la profundidad de falla de los taludes cumpliendo el $FS=1$. Los parámetros geotécnicos obtenidos se relacionan en ecuaciones de resistencia normalizada, para graficarlas vs la profundidad de falla, determinando si los valores de las correlaciones son óptimos para concluir que estas ecuaciones pueden establecer el comportamiento de un talud a media ladera cuando es sometido a condiciones de saturación o fuerzas sísmicas, de acuerdo a la geometría.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los estudios de estabilidad de taludes o laderas se realizan para establecer medidas de prevención y control con el fin reducir los niveles de amenaza y riesgo. En un país como Colombia donde gran parte del territorio nacional se encuentra en zona montañosa, es necesario transformar la geografía para establecer rutas de transporte que permitan la comunicación, entre el centro del país y las zonas costeras desde donde se exporta e importa la materia prima que genera una parte importante de los ingresos del pueblo colombiano. Lo más seguro es que una buena infraestructura vial permita un crecimiento más acelerado de la economía colombiana, dado que se optimiza los recursos como tiempo de desplazamiento y el medio de transporte entre dos puntos geográficos.

Por estas necesidades económicas, sociales y culturales se hace indispensable la utilización de obras que permitan generar una estabilidad del suelo donde se desarrollan las vías que comunican las diferentes ciudades del país. Dentro de estas obras se encuentran muros de contención, rellenos, drenajes, anclajes y construcción de taludes con las cuales se garantiza la perdurabilidad de las vías.

La inestabilidad de un talud se puede producir por un desnivel, que tiene lugar por razones geológicas, por condiciones de saturación o por las obras de ingeniería tales como rellenos o excavaciones. La estabilidad del talud está ligada con la resistencia del material del que lo compone, los empujes a los que es sometido y las discontinuidades que presentan.

Dadas estas condiciones, se plantea la necesidad de primero generar métodos analíticos que relacionen aspectos básicos, tales como la geometría del talud, variaciones de las propiedades geotécnicas, profundidad de falla y condiciones sísmicas, con el fin de llegar a comparar los resultados con los parámetros de resistencia del material que compone el talud y segundo generar técnicas que permitan optimizar el estudio de las obras de contención.

Teniendo en cuenta lo anterior, esta investigación propone dar respuesta al siguiente interrogante, sobre ¿cómo analizar la relación entre la profundidad de falla a partir de los parámetros físicos de un talud tales como la geometría, rangos de variación de propiedades geotécnicas y condiciones de saturación con los parámetros de resistencia de un talud?

2. ANTECEDENTES

En los últimos años la historia de la ingeniería vial del país está ligada a los avances tecnológicos y las nuevas técnicas de hacer ingeniería a base de herramientas sistematizadas como software, técnicas constructivas más exigentes, así como nuevos materiales de construcción que ayudan a mejorar las propiedades mecánicas de los suelos tales como malla o algunos tipos de polietilenos o materiales cementantes; a estos se suman los cambios físicos y geométricos del talud, tales como cambios de pendientes o estructuras de retención en la base del mismo, sin embargo para el desarrollo e implementación de algún cambio en la estructura se realizan estudios que permitan identificar el tipo de suelo a intervenir, estos estudios previos son trascendentales para determinar con más exactitud el comportamiento del suelo a la hora de ser afectado por causas naturales tales como sismo o aumento de saturación del terreno, entre otros.

Como dice Lee¹ el peligro + un estado de vulnerabilidad se convierte en un riesgo eminente, El riesgo es un concepto humano, es decir que cada persona mide el nivel de riesgo según su percepción, sin embargo gracias a los avances tecnológicos se puede establecer una escala para medir el nivel de riesgo que se hace mayor cuando la ciencia avanza y determinan los factores influyentes en un estado determinado de amenaza, por tanto la elaboración de métodos y ensayos en laboratorio que permitan disminuir el nivel de incertidumbre sobre un desastre natural a causa de un deslizamiento teniendo como punto de partida solo información básica del tipo de suelo y su comportamiento mecánico con el fin de generar hipótesis sobre su comportamiento frente a agentes externos tales como sobrecargas, niveles de saturación entre otros.

El análisis de estabilidad de los taludes, bajo una metodología de evaluación simplificada de la vulnerabilidad física, tiene su inicio en otros países como Costa Rica, como lo explica Ulloa, quien desarrolló una investigación basado en un análisis teórico, con variaciones en las propiedades geotécnicas y configuraciones geométricas de los suelos residuales que conforman las rutas de montaña de Costa Rica. Estudio el comportamiento del suelo implementado programas de cómputo que desarrollen el método de Janbu modificado y Bishop, evaluando los componentes geométricos de los taludes, los factores de humedad, saturación y

¹ LEE, Mark. Landslide risk assessment. Londres: Thomas Telford Limited, 2004, p.2 - 9.

coeficiente sísmico. Como resultado obtuvo unas ecuaciones que le permitieron establecer criterios de evaluación preliminar de la vulnerabilidad.²

En este trabajo se recopilan un número de estudios que se han desarrollado en algunas universidades del país y fuera del país, con el fin de indagar e implementar métodos de análisis matemáticos basados en la historia o en estudios de suelos que se han realizado para la construcción de los corredores viales en los cuales se pueden obtener parámetros de resistencia del suelo y trabajar en torno a estos resultados.

Los movimientos de falla de laderas (pendientes naturales) y taludes (pendientes artificiales en excavaciones y rellenos), están determinados por diversos agentes y factores detonantes que en resumen se pueden clasificar en dos: intrínsecos y extrínsecos; los primeros están relacionados con su origen y formación (geología y geomorfología), sus propiedades geotécnicas y sus características hidrogeológicas. Los segundos están relacionados con el clima, los sismos y las acciones antrópicas de los suelos. Entre los que han sido usados para definir parámetros geotécnicos como criterios de identificación y clasificación están: tipo de movimiento, clase de material, tasa de movimiento, geometría del área de falla, edad y causas del depósito resultante, grado de alteración de la masa desplazada, existencia o no de una relación entre la geometría del deslizamiento y la estructura geológica, grado de desarrollo, localización geográfica del caso típico y estado de actividad.³

Existen diversos métodos para estimar la resistencia in situ. Esta resistencia se representa generalmente por los parámetros de resistencia al corte en tensiones efectivas de Mohr-Coulomb, cohesión C' y ángulo de fricción interna ϕ' . El análisis retrospectivo de fallas de taludes es un método efectivo que incorpora importantes factores que muchas veces no son bien representados en ensayos de laboratorio, tales como la estructura del suelo, la no homogeneidad, influencia de fisuras en la resistencia al corte y el efecto de los planos de debilidad dentro de la masa de suelo.

Jorge A. Salgado explica, El análisis retrospectivo asume un factor de seguridad igual a la unidad y considera la geometría original en el momento de la falla. Luego se estima la resistencia al corte del suelo que fue movilizada en la falla consistente con un modelo 2D realizado con un método seleccionado (Spencer, Janbu, Bishop, entre otros.) para

² ULLOA Calderón, Álvaro. vulnerabilidad geotécnica de rellenos en carreteras de montaña de costa rica. Costa Rica: Research Assistant, Department of Civil and Environmental Engineering. University of Nevada Reno p. 1-20

³ GARZÓN MONTAÑO, Edison Ferney. Propuesta metodológica para la evaluación de la amenaza de corredores viales de montaña de la red vial nacional. Cartagena- Colombia: Universidad la Gran Colombia, 5 y 7 de octubre, p. 6.

un $FS=1$. Estudios han demostrado que usando un método que considere todas las condiciones de equilibrio ($\Sigma F=0$, $\Sigma M=0$) se obtiene un factor de seguridad que varía en $\pm 5\%$.

En muchos casos se dispone de poca información de las condiciones bajo las cuales ocurrió un deslizamiento, lo que reduce la confiabilidad de los valores de C y ϕ obtenidos mediante análisis retrospectivo. Estos valores pueden ser utilizados para analizar la estabilidad de otros taludes en la misma formación geológica y recomendar medidas de estabilización si corresponde.

En este numeral se definen los conceptos básicos del análisis retrospectivo de taludes, así como también algunos métodos usados en la obtención de los parámetros de resistencia del suelo, C y ϕ . Para que los resultados obtenidos sean compatibles con las propiedades del suelo al momento de la falla, es necesario tener criterio y experiencia para estimar algunos parámetros necesarios en el análisis, como peso unitario del suelo, presiones de poro, geometría original del talud y estructura del suelo, así como la sensibilidad del resultado frente esta elección. A su vez es necesario conocer las limitaciones y rangos de aplicabilidad para no incurrir en errores de consideración.⁴

De lo anterior se recoge para esta investigación la implementación del análisis retrospectivo, utilizándolos como medio para el análisis de los parámetros geomecánicos del suelo, recomendar las medidas de estabilización necesaria y adecuada de acuerdo a la necesidad de la zona a intervenir.

Lina M. Sastoque⁵, explica la propuesta la gestión de riesgos en proyectos de infraestructura social. Los corredores viales son fundamentales para el desarrollo integral de un país por eso en los últimos años se ha implementado algunos mecanismos de adquisición más importantes del desarrollo de proyecto que permitan hacer una gestión de riesgo antes y durante la ejecución de las obras, estas se denominan asociaciones público privada (PPP) en países desarrollados enfocados en las infraestructuras viales, puertearías etc. Dejando como resultado mejoras significativas en los controles de recursos de tiempo y calidad de las construcciones.

El enfoque principal de la propuesta está dado en que el sector privado tiene que asumir riesgos naturales, financieros, los indicadores macroeconómicos, riesgos

⁴ MORENO SALGADO, Jorge Alejandro. Ajuste a los parámetros de resistencia de depósitos de coluviones mediante correlaciones entre ensayos de laboratorio, exploración geotécnica y retro cálculo. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2013. P 27.

⁵ SASTOQUE Lina María, ARBOLEDA Carlos, PONZ Jose. International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction, A Proposal for risk Allocation in social infrastructure projects applying PPP in Colombia. Bogotá: Universidad de los Andes, 2014. P 21.

de construcción, y los riesgos operativos, mientras que el sector público tiene que asumir los riesgos sociales, el riesgo del proyecto de selección y los riesgos políticos. Por último, los riesgos legales y de la legislación. El riesgo residual y el riesgo de relación debe ser compartido por los sectores público y sector privado.

Analizando la propuesta aplicada en la infraestructura colombiana, se puede idealizar los posibles obstáculos a cada implementación de las PPP en infraestructura social en Colombia, pues como se mencionó anteriormente las empresas privadas asumirían los riesgos con mayor dificultad de cuantificarse dado a que el grado de incertidumbre es muy alto pues son factores que dependen de otros ya sean externo al entorno o del entorno mismo, por tanto la implementación de una metodología analítica como la que se propone en este trabajo permitiría disminuir el grado de incertidumbre frente a los riesgos que se tienen en los corredores viales.

3. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años Colombia ha entrado en una fase de desarrollo rural y urbano a gran velocidad, obligado al país a iniciar el fortalecimiento de los medios de transportes marítimos, aéreos y viales. Este último es seguramente el más importante para lograr un desarrollo integral enfocado en educación, tecnología y comercialización de los productos que aporten al crecimiento del PIB producto interno bruto del país. Actualmente a pesar de los avances realizados por los anteriores gobiernos, Colombia se encuentra con zonas productivas que no cuentan con ningún medio que les permita transportar sus productos y mejorar significativamente la calidad de vida de los habitantes de estas zonas. Esto se suma el reciente proceso de posconflicto en el cual está inmerso todo el país, donde el desarrollo de la infraestructura juega un papel trascendental para el progreso y sostenibilidad de la economía colombiana.

Sin lugar a duda, las condiciones geotécnicas y geográficas de las vías en Colombia generan un desafío constante para los ingenieros civiles, dado a que se deben establecer condiciones que permitan el buen funcionamiento de las mismas y su perdurabilidad en el tiempo, gran parte de las zonas de producción colombiana se encuentran en el centro del país donde el macizo montañoso se convierte en un reto para el transporte de los productos hacia los puertos marítimos donde se exporta hacia el exterior, es por eso que se han implementado vías realizando cortes en las montañas soportados en muros de contenciones, anclajes, redes metálicas y túneles. El presente trabajo busca establecer condiciones que permitan analizar la estabilidad del talud, basado en geografía condiciones de fallas y condiciones sísmicas, bajo el uso de métodos analíticos.

Como se expuso en el seminario “Conflictos Territoriales y Acuerdos de Paz en Colombia”, se plantearon los riesgos que implica para el pos acuerdo la nueva infraestructura vial que tendrá el país, con los proyectos de cuarta generación⁶. Un estudio prospectivo realizado por docentes investigadores de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) de Medellín, sobre el impacto de las obras 4 G (autopistas de la prosperidad) en el departamento de Antioquia, arrojó como resultado el surgimiento de nuevas oportunidades de desarrollo en localidades históricamente azotadas por el conflicto que se dividen así:

⁶ Grupos de investigación Arquitectura- Ciudad-Territorio. Conflictos territoriales y acuerdos de paz en Colombia. En: (Universidad Nacional de Colombia (1) Bogotá: febrero 2016. p. 25-26.

Disminución en tiempo de acceso a las principales ciudades del país en un promedio de 5,7 horas. Como aseguró Viviana Patiño, al disminuir los tiempos de viaje, se disminuye a su vez los índices de pobreza y desigualdad del departamento porque se le brinda a la población más y mejores accesos a bienes, servicios y oportunidades.

36 municipios, es decir, el 52% del departamento, se beneficiará directamente con las oportunidades generadas en la construcción de las nuevas obras. 14 billones pesos ingresarán a la economía antioqueña, aumentando la tasa de crecimiento anual del Producto Interno Bruto del 4.5 % al 6%, superando incluso la tasa de crecimiento proyectada para Colombia. El sector de la construcción sería el más beneficiado, captando el 31% de los ingresos, seguido por el sector Financiero con el 22% y el de Servicios con el 17%. El aumento de los ingresos locales sería de 67.000 millones solo por impuestos de Industria y Comercio.⁷

Lo anterior es un ejemplo del por qué las implementaciones de programas preventivos en los proyectos viales son trascendentales para el desarrollo económico y cultural del país, dado a las necesidades de progreso que se avecina con todo el proceso ya mencionado de posconflicto, donde los avances desmesurados de construcción de accesos viales representan un auge de trabajo muy importante para los colombianos en los próximos años. Como bien se sabe Colombia es un territorio susceptible a la ocurrencia de fenómenos de movimientos de masa, en el que cuatro características favorecen estos fenómenos los cuales son la orografía, el clima, la geotectónica y el ya mencionado desarrollo del país.

La mitad del territorio colombiano es esencialmente montañoso como lo explica los ingenieros de la Universidad Nacional

La primera es la Zona Andina, compuesta por seis regiones: 1) El Macizo Colombiano, al sur, región agrícola, minera y ganadera. 2) La Costa Pacífica, rica en maderas y atracciones turísticas. 3) El Valle del Cauca, región agrícola de gran rendimiento. 4) La Cordillera Central. En sus laderas y valles se encuentran los principales cultivos de café,

⁷ ALVIAR RAMIREZ, Mauricio Autopista para la prosperidad: ¿ Desarrollo sobre ruedas?, 10 de julio de 2015, Disponible en : El Colombiano, <http://www.elcolombiano.com/negocios/autopistas-para-la-prosperidad-desarrollo-sobre-ruedas-2-KJ2281048>

primer producto de exportación del país, e industrias importantes. 5) El Valle del Magdalena. Región agrícola y ganadera. 6) La Cordillera Oriental. En sus estribaciones, altiplanos y valles, se encuentran cultivos y depósitos de minerales importantes.

La segunda zona es la Costa Atlántica, dedicada principalmente a la explotación minera, comercial y turística.

La tercera zona, que abarca cerca de la mitad del territorio colombiano, está conformada por los Llanos Orientales, con recursos petrolíferos y un uso de la tierra de tipo agrícola y ganadero, y la Amazonía, región selvática con grandes recursos, aún desconocidos.

Debido a la longitud de las tres cordilleras de la Zona Andina, y a las grandes alturas de sus montañas, especialmente de la Cordillera Central, y a la dirección dominante Sur-Norte de los ríos principales, existe una notable dificultad geográfica para la comunicación entre las seis regiones de dicha Zona, y entre las tres Zonas, produciéndose una marcada diversidad cultural, y en algún grado étnica, entre sus pobladores.⁸

El clima es otro factor importante en el comportamiento del suelo pues las montañas producen diferentes pisos térmicos, por lo cambios altitudinales de temperatura y de humedad, la interacción de factores como corrientes de aire y núcleos de bajas presión causadas por las variaciones estacionarias de los hemisferios norte y sur, así como la presencia de los dos océanos (Atlántico y Pacífico) a lo largo de las costas colombianas, a esto se suma la ubicación geográfica en zonas intertropical para generar movimientos de masa, producidos por exceso de lluvia y condiciones que se desarrollan a raíz de los factores ya mencionados.

⁸ BETRÀN Moreno. Lisandro, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería Civil Ciencia e Investigación. Elementos del impacto ambiental, producido por los deslizamientos de Taludes Viales Colombianos., Bogotá, No.27 (1992) p.38-47

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la relación entre la profundidad de falla y los parámetros de resistencia de un talud.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Definir diferentes geometrías típicas de taludes, rangos de variación de propiedades geotécnicas y condiciones del agua sub-superficial, empleando el método de equilibrio límite de Bishop y un programa de cómputo.

Analizar la estabilidad con diferentes configuraciones geométricas, propiedades geotécnicas y condiciones sísmicas de los taludes viales analizados.

Deducir posibles relaciones matemáticas de las gráficas de profundidad de falla y los parámetros de resistencia (C/γ).

5. MARCO REFERENCIAL

5.1. MARCO CONCEPTUAL

5.1.1. Estabilidad de taludes

No hay duda de la importancia que tienen los taludes en la construcción de vías terrestres, pues éstas son tal vez la estructura más compleja a la hora de diseñar y construirlas, por eso es necesario definir criterios de estabilidad de taludes basados en conceptos teóricos, en correlaciones de datos y análisis estadísticos de los mismos.

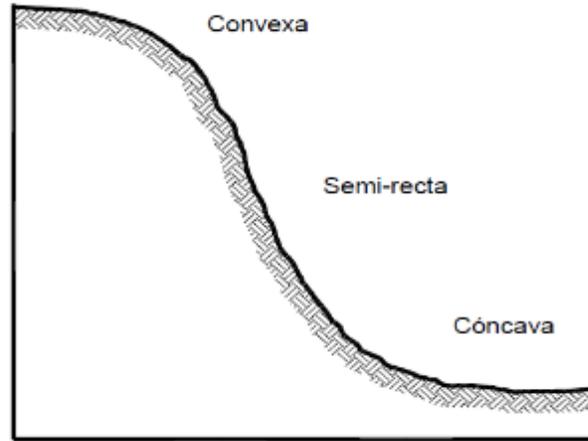
En la literatura técnica se define como “ladera” cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y “talud” cuando se conformó artificialmente.

Los taludes pueden agrupar en tres categorías generales, los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención. Las laderas o taludes que han permanecido estables por muchos años, pueden fallar debido a cambios topográficos, sísmicos, a los flujos de agua subterránea, a los cambios en la resistencia del suelo, la meteorización o a factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad.⁹

La geometría de un talud está dada por la condición de su naturaleza, como se muestra en la figura 1, el talud natural está dividido en 3 zonas una convexa, semi-recta y cóncava. En la figura 2, se describen las partes de una ladera natural en la cual las presiones de tierras o factores externos generan la geometría de su forma, en la figura 3, se muestra un talud artificial intervenido por el hombre.

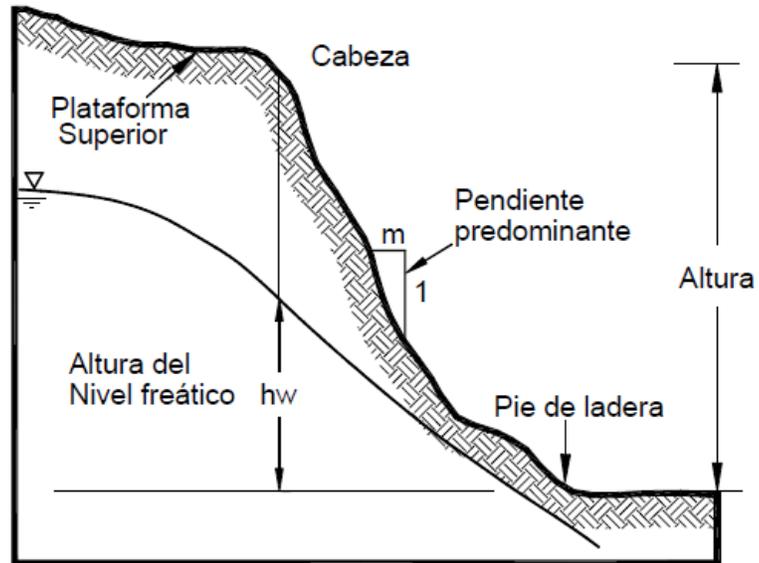
⁹ JAIME SUAREZ, D. Deslizamientos análisis geométrico. Bucaramanga-Santander: Ingeniería de Suelos Ltda, 1993. p. 2-33 (tomo1)

Figura 1. Partes de un talud natural



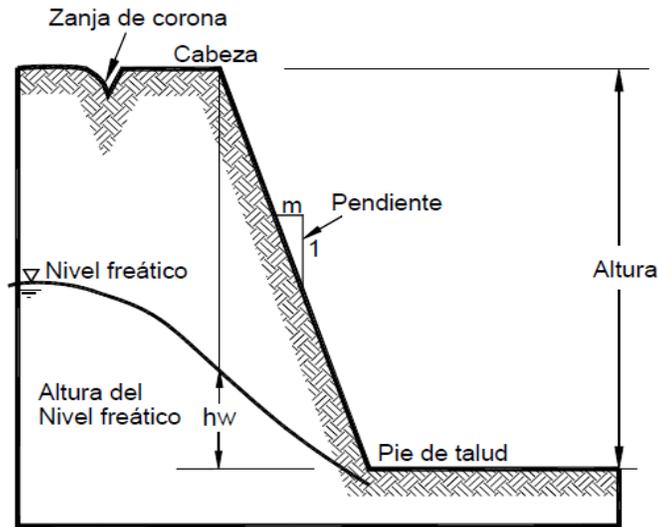
Fuente: <http://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-analisis-geotecnico.html>

Figura 2. Ladera natural



Fuente: <http://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-analisis-geotecnico.html>

Figura 3. Talud artificial (corte o relleno)



Fuente: <http://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-analisis-geotecnico.html>

5.1.2. Factores de los cuales depende la estabilidad de un talud

Debido a su naturaleza, un talud puede estar condicionado por factores geológicos, tales como la litología y la estratigrafía, al ser el suelo un conjunto de estratos en los que cada uno de ellos presenta características y comportamientos diferentes ante las cargas impuestas. Complementando este factor, las discontinuidades y estructuras geológicas combinadas con la geometría del talud, condicionan su estabilidad, ya que pueden existir planos de debilidad, los cuales requieren un tratamiento particular, de forma que no se comprometa la estabilidad del talud.

Adicionalmente, el agua modifica e influye en los parámetros de resistencia de forma negativa, ya que disminuye la capacidad y aumenta el peso de la masa de suelo. Además, ejerce una presión sobre las grietas de tracción, que pueden desencadenar deslizamientos. La presencia de agua en el talud causa erosión, tanto en la cara exterior de la masa de suelo, como en la parte interna debido a la infiltración, lo cual acelera los procesos de meteorización. Esto constituye un cambio en la composición de los materiales, que puede comprometer la estabilidad del talud.

Estos factores pueden considerarse como pasivos, ya que pueden estar presentes mas no son causantes de la inestabilidad; requieren de otros factores para que sus efectos se hagan presentes.

Los factores que afectan de manera directa la estabilidad del suelo son conocidos como factores desencadenantes, véase la tabla 1.

Tabla 1: Factores desencadenantes de la inestabilidad de taludes

SOBRECARGAS ESTÁTICAS	Son todos aquellos pesos de edificios, rellenos y vehículos que inciden en un aumento en la cabecera del talud.
CARGAS DINÁMICAS	Movimientos sísmicos naturales o inducidos y vibraciones productos de voladuras cercanas.
CAMBIOS EN LAS CONDICIONES HIDROGEOLÓGICAS	Un aumento en las precipitaciones causa un aumento en la cantidad de agua en el suelo, provocando un aumento en la saturación lo que disminuye la resistencia.
VARIACIONES EN LA GEOMETRÍA	Si se realizan modificaciones como disminución de peso en el pie del talud, o un aumento en la cabecera, generaría la falla del talud.
REDUCCIÓN DE PARÁMETROS DE RESISTENCIA.	La meteorización disminuye las propiedades de la resistencia.

Fuente: Notas de clase, Estabilidad de Taludes MANUEL García López-ECI

5.1.3. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

5.1.3.1. Método de equilibrio límite

El método de equilibrio límites es uno de los más usados para determinar la estabilidad de un talud, sin embargo, se encuentran otras metodologías tales como métodos numéricos y métodos dinámicos utilizados con más frecuencia en taludes donde se generan desprendimientos de roca y fluidos. El método de equilibrio límite permite el análisis de falla traslaciones y de falla rotacional, así como fallas de inclinación y de cuña, de manera menos compleja que los otros métodos, dado que permite los análisis combinados de técnicas probabilísticas.

El método de equilibrio límite utiliza parámetros como la topografía del talud, estratigrafía, ángulo de fricción, cohesión, peso unitario, niveles freáticos y cargas externas, es uno de los métodos que se pueden usar en cualquier software, donde se puede obtener un número de factores de seguridad, bajo el análisis de superficies de fallas tales como curvas, cuñas, rectas. Sin embargo, estos factores de seguridad tienen en cuenta unos factores de inestabilidad. Los parámetros a tener en cuenta para el análisis por equilibrio límite son la estratigrafía, ángulo de fricción, cohesión, peso unitario, niveles freáticos y cargas externas.

5.1.3.2. Factores de seguridad

Determina cual es el factor de amenaza por las cuales el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Según Fellenius (1922) el factor de seguridad se establece como la relación entre a la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de cortes críticos que trata de producir la falla.

$$F.S. = \frac{\text{Resistencia al corte disponible}}{\text{Esfuerzo al corte actuante}}$$

En las superficies circulares donde existe un centro de giro y momentos resistentes y actuantes:

$$F.S. = \frac{\text{Momentos resistentes disponibles}}{\text{Momentos actuantes}}$$

5.1.3.3. Método de Bishop

Bishop en 1955, presentó un método utilizando dovelas y teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas entre las dovelas. Bishop asume que las fuerzas entre dovelas son horizontales (Figura 4); es decir, que no tiene en cuenta las fuerzas de cortante. La solución rigurosa de Bishop es muy compleja y por esta razón, se utiliza una versión simplificada de su método, de acuerdo con la expresión: ¹⁰

$$F.S. = \frac{\sum \left[\frac{c' \Delta l \cos \alpha + (W' - u \Delta l \cos \alpha) \tan \phi'}{\cos \alpha + (\sin \alpha \tan \phi') / FS} \right]}{\sum W \sin \alpha}$$

Donde:

Δl = longitud de arco de la base de la dovela

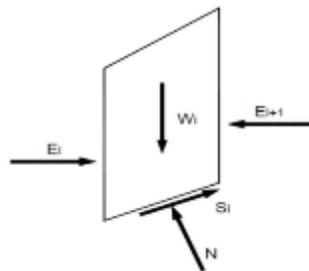
W = Peso de cada dovela

c', ϕ = Parámetros de resistencia del suelo.

u = Presión de poros en la base de cada dovela = $\gamma_w \times h_w$

α = Angulo del radio y la vertical en cada dovela.

Figura 4. Esquema de fuerzas sobre una dovela en el método de Bishop simplificado



Fuente: Duncan y Wrigth, 2005.¹¹

¹⁰ SUAREZ Jaime. Deslizamientos análisis Geométrico, Bucaramanga Santander: Ingeniería de Suelos Ltda, 1993. p. 2-33 (tomo4)

¹¹ DUNCAN J.M., Wright S. G. "Soil Strength and Slope Stability". John Wiley and Sons.Inc. Hoboken. New Jersey 2005, p.297

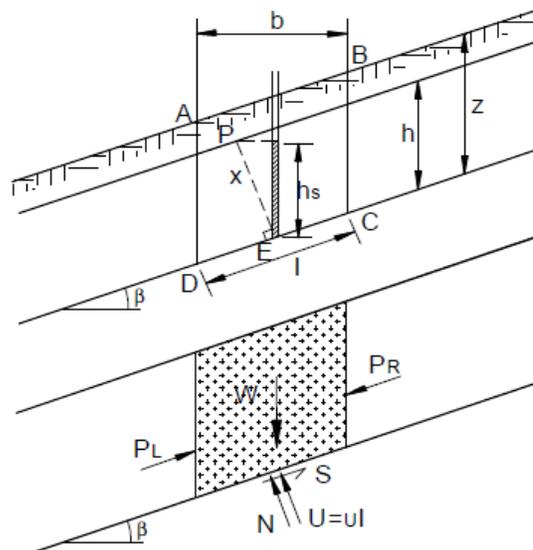
5.1.1. MÉTODO DE TALUD INFINITO

Como indica Suarez. La estabilidad de un talud evaluada por este método, se analiza como superficies de fallas rectas, estableciendo un equilibrio de fuerzas, dentro de un bloque delgado con nivel freático, presentando falla paralela a la superficie.

El método está basado en el análisis al deslizamiento del terreno en una superficie de falla de un talud, si la longitud relativa del deslizamiento es muy grande en relación con su espesor, la contribución de la resistencia en la cabeza y el pie del deslizamiento, es menor comparada con la resistencia del resto de la superficie de falla. Para un talud uniforme y relativamente largo, en el cual el mecanismo de falla esperado no es muy profundo, los efectos de borde son despreciables y el factor de seguridad puede calcularse a partir de una unidad de área con base en el criterio Mohr-Coulomb.¹²

Figura 5 Diagrama de análisis, método del talud infinito. (cornforth, 2005)

Fuente:



<http://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-iv-analisis-geotecnico.html>

La Figura 8 muestra las fuerzas resistentes y actuantes para un talud seco de suelos sin cohesión ($c' = 0$)

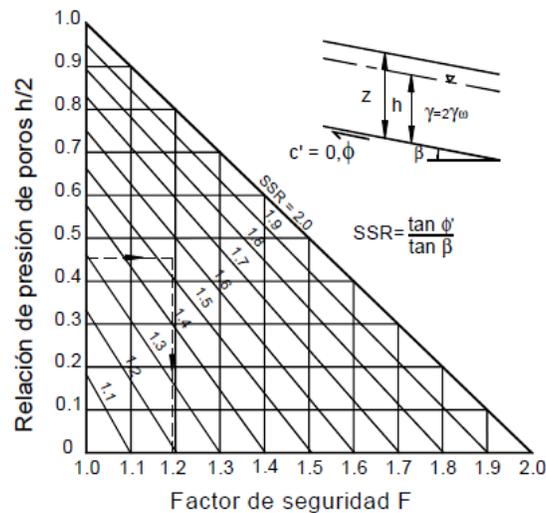
¹² SUAREZ Jaime. Deslizamientos Análisis de estabilidad, Bucaramanga Santander, 1993, (tomo 3), p. 194-196

$$F.S. = \frac{c' + (\gamma z - \gamma_w h) \cos^2 \beta \tan \phi'}{\gamma z \sin \beta \cos \beta}$$

$$F.S. = \frac{\tan \phi'}{\tan \beta}$$

Con base en las anteriores ecuaciones Cornforth, 2005, realiza una determinación de los factores de seguridad para diferentes alturas del nivel de agua de una determinada relación de resistencia para el talud seco.

Figura 6 Relación de presión de poros $h/2$ vs Factores de seguridad F



Fuente: <http://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-iv-analisis-geotecnico.html>

Si el nivel de agua se encuentra en la superficie del terreno, el suelo totalmente saturado y la cohesión es cero se tiene un factor de seguridad:

$$F.S. = \frac{\gamma' \tan \phi'}{\gamma \tan \beta}$$

Dónde:

γ' = Peso unitario sumergido

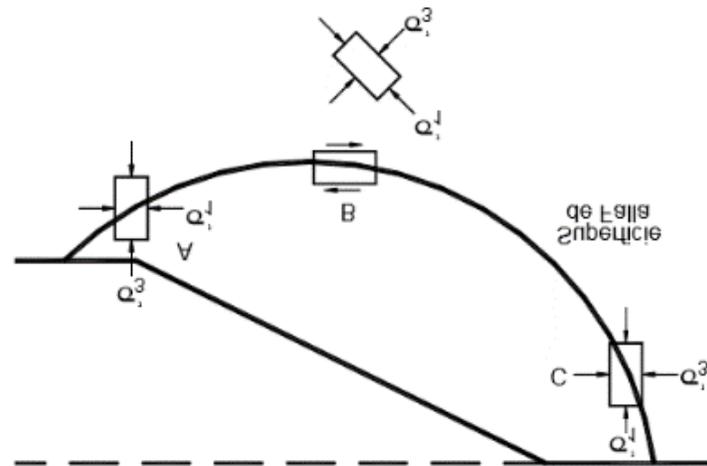
γ = Peso unitario saturado

5.1.2. CIRCULO DE MOHR

La resistencia al corte se compone de un término de fricción, proporcional al esfuerzo normal total sobre el plano considerado. La envolvente de los círculos de Mohr representa el estado de los esfuerzos cuando se produce una falla al cortante. Los esfuerzos en un elemento infinitamente pequeño son $(\sigma_x, \sigma_y, \text{ y } \tau_{xy})$. Donde se representan en una gráfica de coordenadas τ - σ definiendo los esfuerzos principales.

Jaime Suárez, presenta la siguiente definición, “para interpretar correctamente el fenómeno de falla al cortante en un talud, debe tenerse en cuenta cual es la dirección del esfuerzo principal de cada sitio de la superficie de falla El esfuerzo σ_1 es vertical en la parte superior de la falla y horizontal en la parte inferior”.¹³

Figura 7 Dirección de los esfuerzos principales en la falla de un talud.



Fuente: [librodeslizamientosti_cap3.pdf](#)

La envolvente de falla es curva, pero para efectos prácticos se define como una recta aproximada dentro de un rango seleccionado de esfuerzos a partir de la siguiente ecuación.

$$S = c' + \sigma' \tan \phi'$$

c' = Cohesión

ϕ' = Angulo de fricción

¹³ SUAREZ, Jaime, Deslizamientos Análisis de estabilidad, Bucaramanga Santander, 1993, (tomo 3), p. 194-196

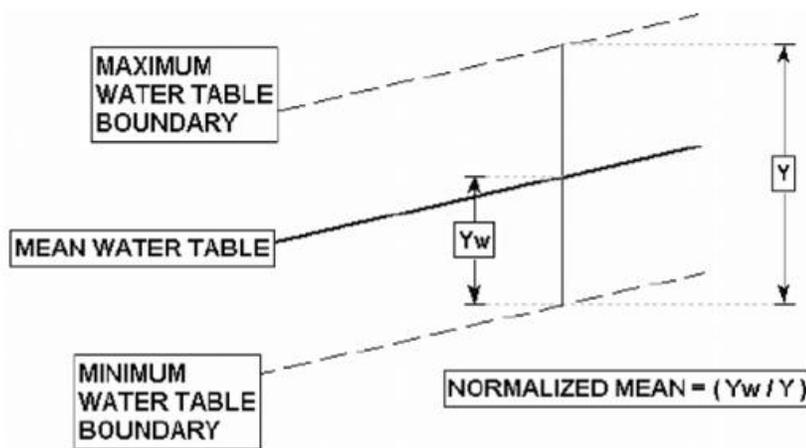
El trabajo realizado por de Mohr Coulomb es la teoría más acorde con el método de Bishop. Método de análisis utilizado en las modelaciones trabajadas en este documento.

5.1.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad se usa frecuentemente para evaluar los riesgos asociados a una determinada solución constructiva, el análisis de sensibilidad permite determinar la importancia de los parámetros que tienen mayor influencia sobre la estabilidad de un talud. Para los parámetros del terreno los valores que se toman se deben conocer de manera precisa, mientras que si se trata de parámetros de diseño se manejan de tal forma que garantice una estabilidad de menor costo.¹⁴

Un análisis de sensibilidad se basa en definir como variables aleatorias los parámetros de entrada, determinando unos rangos máximos y mínimos. El objetivo es determinar la influencia de cada uno de estos parámetros de entrada sobre un parámetro de salida; donde el parámetro de entrada es variado en incrementos uniformes entre los valores máximos y mínimos, calculando el factor de seguridad de la superficie de desplazamiento mínimo. Con el fin de obtener una gráfica que relacione los factores de seguridad con los parámetros de entrada determinando así la sensibilidad del factor de seguridad, generando la alternativa de cambiar los parámetros de entrada sin alterar los otros parámetros de entrada de menor importancia. En la figura 10 se presenta gráficamente el análisis de sensibilidad para un nivel freático.¹⁵

Figura 8 Definición de la ubicación de napa freática media normalizada



¹⁴ Rotura plana rotura en cuña, Ricardo Laín Huerta.

¹⁵ Análisis de sensibilidad, manual de slide Tutorial de arranque rápido, https://www.roscience.com/help/slide/webhelp/pdf_files/tutorials/Tutorial_09_Sensitivity_Analysis.pdf

Existen varias formas de presentar los resultados del análisis de estabilidad, entre los cuales se encuentran los diagramas tipo araña, en los que cada variable significativa de entrada se va variando para una serie de valores, obteniendo los resultados de la variable de salida correspondientes y representándose gráficamente.

5.1.4. TIPOS DE SUELOS

Para el desarrollo de la investigación se realizará el análisis a dos tipos de suelos específicamente los suelos coluviales y los suelos residuales, dados a que estos son uno de los suelos más comunes en la estructura de un talud. A continuación, se presenta una breve descripción de los mismos, así como las características más importantes para determinar la profundidad de falla y su factor de seguridad, según las condiciones a las cuales serán sometidos en la modelación en SLIDE.

5.1.4.1. Suelos coluviones

Los suelos coluviales son formaciones a partir de materiales transportados por gravedad, ya sea por materiales suelos, por factores de erosión o transporte de agua no canalizada, son suelos con características como alta porosidad y compresibles, suelos permeables formados mediante clastos angulares con una matriz arcillosa.

Los tipos de depósitos coluviales dependen básicamente de dos factores, primero el tipo de movimientos ya sea desprendimientos de material, deslizamientos, expansiones laterales y flujo. El segundo factor depende del tipo de material ya sea sustratos, derrubios o tierra.

Como dice Suárez,¹⁶ la resistencia de los suelos coluviales de matriz arcillosa tienen un comportamiento de esfuerzo deformación que depende de la densificación del material o viscosidad del mismo, los procesos de compresión y expansión cuando el suelo se mueve generan alteraciones en la resistencia del material dado a que el movimiento nos es monolítico. La viscosidad mencionada anteriormente no es una viscosidad intrínseca es una viscosidad relativa, la cual depende de las presiones tanto negativas cuando el material se expande y positivas cuando el material es sometido a compresión. No se puede definir una

¹⁶ Y ¹⁴ SUAREZ. J. Resistencia al corte, Bucaramanga Santander, tomo 3, 1993 p. 123.

resistencia real del material pues como lo explica Suarez¹⁷ basado en estudios de Asch y otros en el 2007 “muestra que la resistencia real de los movimientos en el campo, es 1000 veces la resistencia residual obtenida en los ensayos de laboratorio”.

5.1.1. RELACIÓN DE PRESIÓN DE POROS (R_u)

La relación de presión de poros se define como:

$$R_u = \frac{u}{\gamma H}$$

Dónde:

U = presión de poros

Y = peso unitario total de suelo

H = profundidad correspondiente a la presión de poros u .

Para un talud existente. La presión de poros puede determinarse en mediciones de campo, efectuados por piezómetros instalados en la profundidad de deslizamiento.

El principal problema de este factor es que no es uniforme en todo el talud por lo cual en ocasiones para realizar un mejor análisis es necesario realizar unas subdivisiones en regiones con diferentes valores de ru .

Para la condición de infiltración paralela al talud, que es muy frecuente, el valor de R_u se calcula de

$$R_u = \frac{X}{T} \frac{\gamma_w}{\gamma} \cos^2 \beta$$

Ecuación 2: (infiltración paralela al talud)

Dónde:

X = distancia de la profundidad de deslizamiento a la superficie de la infiltración, medida normalmente a la superficie del talud.

T = distancia de la profundidad de deslizamiento a la superficie del talud, medida normalmente a la superficie del talud.

γ_w = peso unitario del agua.

γ = peso unitario total del suelo.

β = ángulo del talud.

Para el caso de la infiltración emergido del talud, que es más crítico que la infiltración paralela al talud, el valor de R_u puede calcularse:

En donde $R_u = \frac{\gamma_w}{\gamma} \frac{1}{1 + \tan \beta \tan \theta}$ infiltración emergiendo del talud

Tabla 2 presiones de suelos

TIPO DE PRESIONES	DESCRIPCIÓN
Superficie piezométrica	Se denomina como la distancia vertical entre la superficie piezométrica y el punto a analizar. Teniendo en cuenta que la superficie piezométrica no es la superficie freática.
Presión de poros constante	Este sistema se emplea para analizar la estabilidad de rellenos colocados sobre suelos blandos, durante la construcción, donde se generan presiones de poros de acuerdo con la teoría de consolidación.
Presiones de poros negativas	Este parámetro es utilizado para aprovechar la resistencia adicional o la cohesión aparente, debida a la succión de los suelos no saturados. Sin embargo, estos valores de resistencia no son del todo confiables por tanto en este trabajo no se tendrá en cuenta.

Fuente: <http://www.bdigital.unal.edu.co/53560/21/analisisdeestabilidaddetaludes.pdf>

5.1.2. VALORES TÍPICOS DE COHESIÓN ANGULO DE FRICCIÓN Y PESO UNITARIO

En este capítulo se recopilan de las principales fuentes bibliográficas enfocados en el análisis y estabilidad de taludes, los datos que hacen parte de esta investigación son datos estándares que se han analizado a través de los años por los autores mencionados en cada una de las tablas presentadas en el anexo 1.

Tabla 3 Resumen de Bibliografía tomada para determinar los parámetros Geotécnicos

REFERENCIA	SUELO COLUVIAL				
	AUTOR	Cohesion KN/m ² (C)	Angulo (°) (Ø)	Peso Unitario (ysat) KN/m ³	Peso Unitario seco KN/m ³
1	(Hoek y Bray. 1919) Manual de estabilidad de taludes pag. 111	10 a 30	34 a 45	23 a 28	
2	González. A. (1999). Estimativos de Parámetros Efectivos de Resistencia con el SPT.	3	33 a 34		
3	BOWLES. E. (1997). Foundation Analysis and Design. P. 636		22		
4	BOWLES. E. (1997). Foundation Analysis and Design. P. 163		32 a 36	17 a 20	
5	BOWLES. E. (1997). Foundation Analysis and Design. P. 668		3 a 20		
6	Casagrande, A. (1948)		31 a 36		19
7	HERNANDEZ, Andrei Orland. (2013) Selección de alternativas de mitigación del riesgo por procesos de remoción en masa. (Arena)	34	27	19	
	HERNANDEZ, Andrei Orland. (2013) Selección de alternativas de mitigación del riesgo por procesos de remoción en masa. (Limos)	40	25	19	
	HERNANDEZ, Andrei Orland. (2013) Selección de alternativas de mitigación del riesgo por procesos de remoción en masa. (Arcilla)	39	26	19	
8	Handbook of geotechnical engineering, 2002		32 a 40	19 a 22.5	

Fuente: Elaboración propia

5.2. MARCO LEGAL

El presente trabajo tiene como base algunos documentos académicos e investigativos que permiten tomar algunos avances sobre los conceptos implícitos en el presente documento, la fundamentación normativa para el desarrollo de los parámetros y condiciones de los corredores viales se convierten en un aspecto de total vitalidad debido a que es necesario determinar los alcances de cada normativa y su enmarcación dentro de la investigación.

Tabla 4 Normativa colombiana para taludes

DECRETO O NORMA	DESCRIPCIÓN
LEY 1523 DE 2012	La ley de gestión de riesgos indica un análisis del riesgo y las causas o fuentes del mismo, así como las consecuencias y la probabilidad de que estas consecuencias se lleguen a dar. “La ley lo analiza mediante la relación cualitativa, semicuantitativa o cuantitativa de la amenaza y la vulnerabilidad” ¹⁸ . Arrojando como resultado una estimación de daños, costos asociados y posibles pérdidas, para lo cual se aplican unos métodos y procesos que permitan cuantificar el riesgo. ¹⁹
DECRETO 019 DE 2012	Este decreto plantea una delimitación y zonificación de las áreas de amenazas, de las áreas en condiciones de riesgo y plantea la determinación de las medidas específicas para mitigar el riesgo. ²⁰
DECRETO 1077 DE 2015 ANTES	Para llevar a cabo un análisis de amenaza, se deben observar factores trascendentales que generan una inestabilidad del terreno ya sean factores antrópicos, agua y sismos. ²¹ El decreto plantea la incorporación de la gestión de riesgo al POT (Plan de Ordenamiento Territorial), estableciendo una delimitación y zonificación de las

¹⁸ COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Ley 1523. (24 de abril, 2012). Por el cual se adopta la política nacional de gestión de riesgo de desastres y se establece el sistema de gestión del riesgo de desastres y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogotá, D.C. 2012.no. p. 1-30

¹⁹ SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Bogotá D.C. Colombia 2015 p. 1-182.

²⁰ COLOMBIA. EL PRESIDENTE DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA. Decreto 019. (10 de enero de 2012). Por el cual se dictan normas para suprimir o reformar regulaciones, procedimientos y trámites innecesarios existentes en la Administración Pública. Diario Oficial. Bogotá, D.C. 2012 no. p. 1-152.

²¹ COLOMBIA, MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Decreto 1077. (26 mayo 2015). Por medio del cual se expide el decreto único reglamentario del sector vivienda, Ciudad y Territorio. Diario Oficial. Bogotá, D.C. 2015 p- 1-172.

<p>Decreto 1807 de 2014</p>	<p>áreas de amenazas, así como unas áreas donde las amenazas requieren unos estudios más detallados. La determinación de las medidas de intervención, orientadas a establecer restricciones y condicionamientos mediante determinación de normas urbanísticas.</p> <p>En este decreto se plantea el componente de estudios para llevar a cabo un correcto estudio de remoción en masa, determinando así: las áreas con condición de amenaza, en condición de riesgo y llevar así unas medidas de intervención, generando así una mejor calidad de vida de los habitantes y disminuyendo los costos de inversión en mantenimiento en los corredores viales.²²</p>
<p>NSR 10</p>	<p>Los parámetros normativos que se determinan en la NSR 10 están enfocados en determinar características básicas de la estabilidad de un talud, analizando el subsuelo, condiciones de cargas a los cuales serán sometidos ya sean cargas externas o internas por alteración en la condición geo mecánicas, hidrogeológicas los sistemas constructivos o eventos sísmicos.</p> <p>Análisis sísmico:</p> <p>Para el análisis y diseño de taludes se debe emplear una aceleración máxima del terreno obtenida por análisis espectral o por un análisis de amplificación de ondas unidimensionales o bidimensionales. Los coeficientes sísmicos para el diseño pseudoestático de taludes KST tienen valores inferiores o iguales a a_{max}, sin embargo, se admiten valores de Kst/a_{max}. Según el tipo de material del terreno.²³</p>
	<p>Esta ley se enfoca en las funciones del municipio, los cuales deben implementar los planes de desarrollo</p>

²² COLOMBIA, MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Decreto 1807 (19 septiembre 2014) Por la cual se reglamenta el artículo 189 del decreto ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones. Bogotá El Ministerio, 2014 p. 1-16.

²³ COLOMBIA, COMISIÓN ASESORA PERMANENTE PARA LE RÉGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES, NSR 10 (19 marzo de 2010). Reglamento colombiano de construcción sismo resistentes. Bogotá. D.C. El ministerio, 2010. Título H. p. H21.

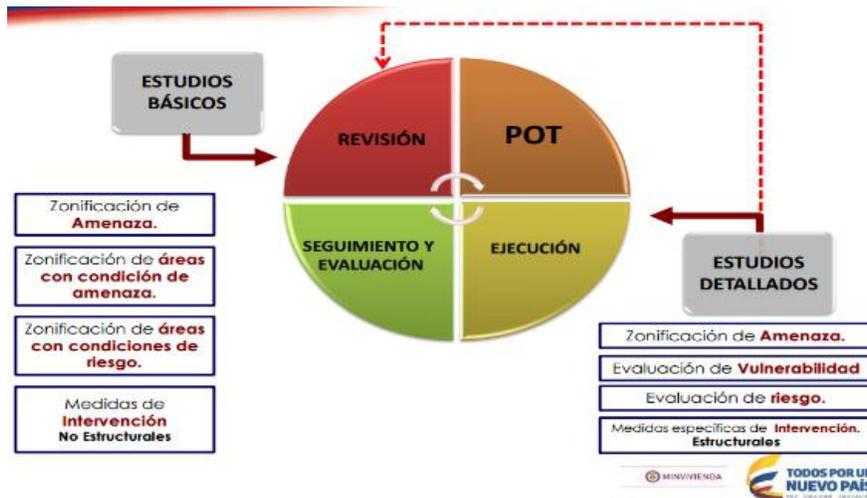
<p>LEY 1551 DE 2012</p>	<p>municipal, teniendo en cuenta la opinión de las habitantes de la zona y cumplir las estrategias y políticas dirigidas a promover el desarrollo de su territorio. Adoptando los planes de desarrollo territorial donde se reglamenta de manera específica el uso del suelo²⁴</p>
<p>RESOLUCIÓN 364 DE 2000</p>	<p>La resolución está enfocada en la ejecución de estudios detallados de riesgo por fenómenos de remoción en masa para proyectos urbanísticos y de construcción de edificaciones en Bogotá D.C, localizados en zonas de amenaza alta y media por fenómenos de remoción en masa.²⁵</p>
<p>LEY 400</p>	<p>La presente ley establece criterios y requisitos mínimos para el diseño, construcción y supervisión técnica de edificaciones nuevas, así como de aquellas indispensables para la recuperación de la comunidad con posterioridad a la ocurrencia de un sismo, que puedan verse sometidas a fuerzas sísmicas y otras fuerzas impuestas por la naturaleza o el uso, con el fin de que sean capaces de resistirlas, incrementar su resistencia a los efectos que éstas producen, reducir a un mínimo el riesgo de la pérdida de vidas humanas, y defender en lo posible el patrimonio del Estado y de los ciudadanos.</p>

La normativa presentada se establece para llevar a cabo el orden y modelo a seguir planteado por el Ministerio de Vivienda como se presenta a continuación en la figura 23.

²⁴ COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Ley 1551. (6, julio 2012). Por el cual se dictan normas para modernizar la organización y el funcionamiento de los municipios. Bogotá D.C. El Ministerio, 2012. P.5-12

²⁵ COLOMBIA. SECRETARIA DISTRITAL DE GOBIERNO – DIRECCIÓN DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE DESASTRES. Resolución 364 (17, octubre 2000). Por la cual se emiten los términos de referencia para estudios detallados de amenaza y riesgo por fenómenos de remoción en masa que trata el artículo 85 del Decreto 619 de 2000 (Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá). Bogotá D.C. DPAE. 2000.P. 1-3

Figura 9 Esquema guía general de control de riesgo



Fuente: <http://www.minvivienda.gov.co>

6. DISEÑO METODOLÓGICO

6.1. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

En la investigación se desarrolló un enfoque mixto (cualitativo y cuantitativo), puesto que se realizó un análisis retrospectivo de los parámetros geotécnicos donde se encuentra el enfoque cuantitativo. A partir de la modelación y de los análisis de los datos se plantea una serie de graficas que permiten establecer un análisis cualitativo de la investigación, donde se desarrollen las correlaciones y el análisis matemáticos que establezcan la relación entre la profundidad de falla $FS=1$ y los parámetros de resistencia.

6.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Es una investigación de tipo documental elaborada en base a investigaciones previa sobre el tema en mención, donde la variación se denota en el tipo de análisis que se ejecute frente a los datos y parámetros obtenidos, es decir las correlaciones obtenidas serán elaboradas en base a parámetros físicos y caracterización de suelos, no solo teniendo en cuenta este último como por lo general se ha hecho hasta la fecha.

6.3. MUESTRA

No se puede establecer una zona específica para la aplicación de este trabajo, dado a que en gran parte del desarrollo de las vías en el país presenta una

relación directa con el análisis que se plantea desarrollar, dado a que gran parte del territorio nacional cuenta con una zona montañosa generando una gran presencia de suelos coluviales.

Por tal razón se plantea una matriz que establece una serie de parámetros para el análisis geo mecánico del suelo de acuerdo a las características físicas del talud. Para suelos en condición estática como se presenta en la tabla 10.

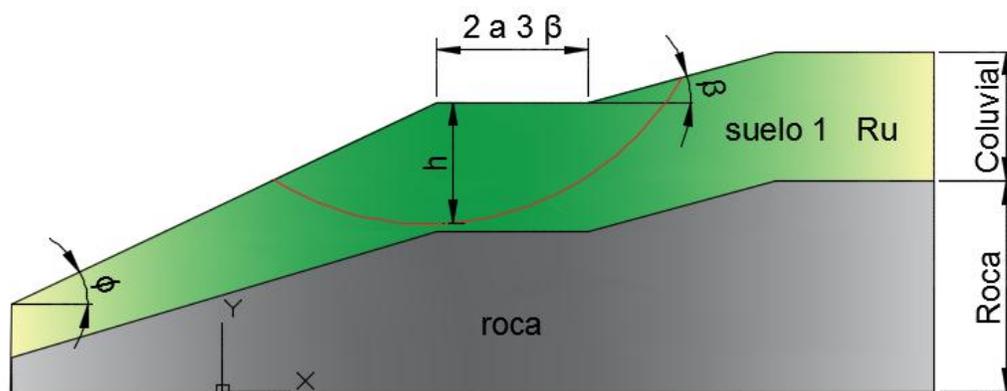
6.4. DEFINICIÓN Y OPERACIÓN DE VARIABLES

6.4.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE PARÁMETROS

El análisis de sensibilidad de los parámetros se utiliza para determinar la modificación del coeficiente de seguridad entre los parámetros asociados al modelo que definen el comportamiento del talud, ya sea los parámetros resistentes o la geometría.

Para el desarrollo de esta investigación se tomaron valores máximos y mínimos para los parámetros geo mecánicos de suelos coluviales y residuales determinados a partir de la recopilación bibliográfica presentada en el anexo 1. Basado en esta información se varían los valores de cohesión y ángulo de fricción con el objetivo de determinar el comportamiento del talud cuando es sometido a una saturación y cuando se encuentra en estado pseudoestática.

Figura 10 Variables Geométricas



Fuente: Elaboración propia

θ : Ángulo interno del terreno natural. Típicamente $15^\circ \leq \theta \leq 40^\circ$

β : Ángulo externo del talud. Típicamente $\beta \geq 15^\circ$ $\beta \leq 40^\circ$ (Relaciones V:H de 1:2 y 1:1)

h: altura del relleno (3 a 15 metros)

a: ancho total de la carretera o vía. Típicamente 10 a 15 m (2 ó 3 carriles).

Los parámetros geotécnicos usados fueron los siguientes:

γ_1 : peso unitario del Suelo 1

β_i : ángulo de fricción del material del Suelo 1

C1: resistencia en condición no drenada (cohesión) del material de Suelo 1

6.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

En desarrollo de la investigación se determinó la necesidad de realizar una matriz que permita recolectar la información de manera organizada, en la Figura 11 se presenta la matriz a trabajar.

Figura 11 Formato de recolección de datos

COLUVIAL																			
PROFUNDIDAD (h) 3:00m a 15.00m			SIN SISMO										CON SISMO						
RU			0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	VARIA 0.1 A 0.5											
SISMO			0.1		0.15		0.20		0.25		0,30								
PENDIENTE	β	γ	C	ϕ	C	ϕ	C	ϕ	C	ϕ	C	ϕ	C	1	C	ϕ	C	ϕ	
VARIABLE 15° A 40°	15	18																	
	20																		
	25																		
	30																		
	35																		
	40																		

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5 se presenta la matriz para condición estática, para las respectivas geometrías a trabajar y con condiciones de saturación de manera gradual. En la Tabla 6 se presenta la matriz para condición pseudoestática, con condiciones de saturación de manera gradual, así como un valor de fuerza sísmica.

Tabla 5 Matriz para condición estática

COLUVIAL												
PROFUNDIAD (h) 3:00m												
RU			0.1	0.2		0.3		0.4		0.5		
SISMO			sin sismo									
PENDIENTE	β	γ	C	\emptyset	C	\emptyset	C	\emptyset	C	\emptyset	C	\emptyset
15	15											
	20											
	25											
	30											
	35											
	40											
20	15											
	20											
	25											
	30											
	35											
	40											
25	15											
	20											
	25											
	30											
	35											
	40											
30	15											
	20											
	25											
	30											
	35											
	40											
35	15											
	20											
	25											
	30											
	35											
	40											
40	15											
	20											
	25											
	30											
	35											
	40											

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6 Matriz para condición pseudoestatica

PROFUNDIDAD (h) 3.00m		COUNIVAL														
		0.1		0.2		0.3		0.4		0.5		0.30				
RU	SAVO	0.1	0.15	0.20	0.25	0.30	0.1	0.15	0.20	0.25	0.30	0.1	0.15	0.20	0.25	0.30
PENDIENTE	β	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	15															
	20															
	25															
	30															
	35															
	40															
20	15															
	20															
	25															
	30															
	35															
	40															
25	15															
	20															
	25															
	30															
	35															
	40															
30	15															
	20															
	25															
	30															
	35															
	40															
35	15															
	20															
	25															
	30															
	35															
	40															
40	15															
	20															
	25															
	30															
	35															
	40															

6.5.1. Software SLIDE

SLIDE (Stability Analysis for Soils and Rock Slopes). Este software se desarrolló bajo el método de equilibrio límite con un mecanismo de falla de Mohr- Coulomb. Para la modelación desarrolla se trabajó con un análisis de sensibilidad donde se definieron los límites máximos y mínimos de los parámetros geo mecánicos del suelo (cohesión Angulo de fricción, peso específico). Establecidos según la información bibliográfica recopilada y presentada en el anexo 1. se estableció una condición hidrogeológica incorporando un rango de parámetros de coeficientes de presiones intersticial (R_u).

6.6. FASES DEL PROYECTO

6.6.1. Fase 1: Identificación de los parámetros de resistencia para las modelaciones

Actividad 1: Recopilación de información relevante sobre taludes en Colombia (Revisión exhaustiva y control por parte de los asesores)

- Determinar de los tipos de suelos a trabajar (Coluviones).
- Establecer relaciones de las investigaciones ya previas sobre cada uno de los suelos que aporten a la investigación en cuanto a parámetros que infieran en la resistencia de un talud y sus condiciones

Actividad 2: Recopilación de teorías e información bibliográfica referente a teorías y conceptos sobre métodos de análisis de superficie de fallas en taludes.

- Relación de parámetros ya establecidos teóricamente con taludes ej.: Teoría de Morh coulomb, Talud infinito entre otros.

Actividad 3: Realizar la selección de la información que aporte a la investigación propuesta.

- Basado en los antecedentes sobre tipos de suelos, tipos de taludes delimitar el nivel actual de la investigación

- Identificar los métodos más apropiados para el análisis de taludes según las características del suelo y la geometría del talud.
- Análisis y selección de rangos de variables de (C/γ) .

6.6.2. Fase 2: Modelaciones y Elaboración de gráficas, análisis de ecuaciones resistencia normalizada

Actividad 1: Lectura y aprendizaje del programa Slide (realización de ejercicios de manual y prácticos)

- Lectura del manual del software
- Realización de ejercicios de estabilidad con nivel freático y R_u
- Validación de ejercicios y revisión de cada uno por el director.

Actividad 2: Análisis de estabilidad según la modelación en Slide de taludes típicos según los resultados de la fase 1.

- Análisis dinámico de los taludes a partir de software (slide)
- Análisis de la estabilidad del talud a partir de los métodos (Bishop)
- Establecer los FS a partir de un factor sísmico dentro del análisis.

Actividad 3: Evaluación estadística sobre los parámetros físicos delimitados

- Determinar correlaciones matemáticas sobre los valores obtenidos

Actividad 4: Elaboración de grafica entre los parámetros de resistencia vs altura de falla.

- Elaborar gráficas de resistencia normalizada vs Altura de falla, para suelos coluviones

- Análisis de sensibilidad de resultados con variación de parámetro R_u (Relación de presión de poros)

6.6.3. Fase 3: Análisis de Correlaciones

Actividad 1: Evaluación inicial de los resultados obtenidos.

- Análisis de resultados y gráficas
- Ajuste de gráficas y elaboración de ecuaciones y regresiones matemáticas
- Análisis de resultados y ajuste de gráficas y ecuaciones obtenidas.



6.1. CRONOGRAMA

TRABAJO DE GRADO: ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA PROFUNDIDAD DE FALLA DE UN TALUD VIAL Y LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA				UNIVERSIDAD La Gran Colombia Fundada en 1951	
PRESENTADO POR: MARIA CONSUELO NOVA AVENDAÑO					
Identificación de los parámetros de resistencia para las modelaciones					FECHA FINAL
FASE 1	Actividad 1	Recopilación de información relevante sobre taludes en Colombia (Revisión exhaustiva y control por parte de los asesores)	Determinar de los tipos de suelos a trabajar se contemplan las siguientes alternativas (Coluviones, Aluvial, suelos residuales, Arcillas, Arenas)	Lunes, 25 de julio de 2016	
			Establecer relaciones de las investigaciones ya previas sobre cada uno de los suelos que aporten a la investigación en cuanto a parámetros que infieran en la resistencia de un talud y sus condiciones	viernes, 29 de julio de 2016	
	Actividad 2	Recopilación de teorías e información bibliográfica referente a teorías y conceptos sobre métodos de análisis de superficie de fallas en taludes	Relación de parámetros ya establecidos teóricamente con taludes ej.: Teoría de Mohr coulomb, Talud infinito entre otros.	viernes, 5 de agosto de 2016	
	Actividad 3	Realizar la selección de la información que aporte a la investigación propuesta.	Basado en los antecedentes sobre tipos de suelos, tipos de taludes delimitar el nivel actual de la investigación	Lunes, 29 de agosto de 2016	
			Identificar los métodos mas apropiados para el análisis de taludes según las características del suelo y la geometría del talud	martes, 30 de agosto de 2016	
			Análisis y selección de rangos de variables de (C/φ).	Lunes, 25 de julio de 2016	
FASE ANALÍTICA					
FASE 2	Actividad 1	Lectura y aprendizaje del programa Slide (realización de ejercicios de manual y prácticos)	Lectura del manual del software	martes, 30 de agosto de 2016	
			Realización de ejercicios de estabilidad con nivel freático y Ru	Lunes, 25 de julio de 2016	
	Actividad 2.	Análisis de estabilidad según la modelación en Slide de taludes típicos según los resultados de la fase 1.	Análisis dinámico de los taludes a partir de software (slide)	Lunes, 5 de septiembre de 2016	
			Análisis de la estabilidad del talud a partir de los métodos (fellenius, Bishop)	martes, 30 de agosto de 2016	
	Actividad 3.	Evaluación estadística sobre los parámetros físicos delimitados	Establecer los FS a partir de un factor sísmico dentro del análisis.	martes, 13 de septiembre de 2016	
			Determinar correlaciones matemáticas sobre los valores obtenidos	martes, 13 de septiembre de 2016	
Actividad 4.	Elaboración de gráfica entre resistencia normalizada vrs profundidad de falla.	Elaborar gráficas de resistencia normalizada vs Altura de falla, para suelos coluviones	martes, 13 de septiembre de 2016		
		Análisis de sensibilidad de resultados con variación de parámetro Ru (Relación de presión de poros)			
Análisis de Correlaciones					
FASE 3	Actividad 1.	Evaluación inicial de los resultados obtenidos.	Análisis de resultados y gráficas	jueves, 13 de octubre de 2016	
			Ajuste de graficas y elaboración de ecuaciones y regresiones matemáticas	viernes, 28 de octubre de 2016	
	Actividad 5.	Entrega y socialización de observaciones de jurado	Análisis de resultados y ajuste de gráficas y ecuaciones obtenidas.	sábado, 25 de febrero de 2017	
			Ajuste de observaciones	miércoles, 15 de marzo de 2017	
	Actividad 4.	Ajuste de documento		martes, 28 de marzo de 2017	
	Actividad 5.	Revisión por parte de Asesores		Lunes, 17 de abril de 2017	
Actividad 6.	Elaboración de presentación en slides y revisión.				
Actividad 6.	Presentación de sustentación				

Fuente: Elaboración propia

6.2. PRESUPUESTO

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA		EMISION	PAGINA	
CÓDIGO: R-07-17PPIJI		01/05/2011		
REGISTRO: PRESUPUESTO PARA PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN JÓVENES INVESTIGADORES		REVISION	No. REV	
				
NOMBRE DE JOVEN INVESTIGADOR		María Consuelo Nova		FACULTA
TÍTULO DEL PROYECTO		ANÁLISIS DE LA RELACION ENTRE LA PROFUNDIDAD DE FALLA DE UN TALUD VIAL Y LOS PARAMETROS DE RESISTENCIA		
LÍNEA CENTRAL	GEOTECNIA GRANCOLOMBIANA PARA EL DESARROLLO DE LA INFRAESTRUCTURA REGIONAL Y EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE VIDA – GGIR		LÍNEA PRIMARIA	RIESGOS GEOTÉCNICOS POR INESTABILIDAD DE TALUDES Y LADERAS – RGILT
1. MATERIALES PARA EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN				
ITEM	DESCRIPCIÓN/JUSTIFICACIÓN	VALOR UNITARIO	CANTIDAD	VALOR TOTAL
1	Papelería y fotocopias	\$ 80.000,00	1	\$ 80.000
				\$ -
VALOR TOTAL PRESUPUESTO DE MATERIALES PARA EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN				\$ 80.000
2. EQUIPOS Y SOFTWARE PARA EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN				
ITEM	DESCRIPCIÓN/JUSTIFICACIÓN	VALOR UNITARIO	CANTIDAD	VALOR TOTAL
				\$ -
				\$ -
VALOR TOTAL PRESUPUESTO DE MATERIALES PARA EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN				\$ -
3. VIAJES Y SALIDAS DE CAMPO PARA EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN				
ITEM	DESCRIPCIÓN/JUSTIFICACIÓN	VALOR UNITARIO	CANTIDAD	VALOR TOTAL
2	Auxilio de transporte para trabajos de campo, levantamiento de información, visita a entidades entre	\$ 40.000,00	1	\$ 40.000
3	Viáticos	\$ 60.000,00	1	\$ 60.000
				\$ -
				\$ -
VALOR TOTAL PRESUPUESTO DE MATERIALES PARA EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN				\$ 100.000
4. ASESORÍAS TÉCNICAS PARA EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN				
ITEM	DESCRIPCIÓN/JUSTIFICACIÓN	VALOR UNITARIO	CANTIDAD	VALOR TOTAL
				\$ -
				\$ -
VALOR TOTAL PRESUPUESTO DE ASESORÍAS TÉCNICAS PARA EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN				\$ -
5. BIBLIOGRAFÍA PARA EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN				
TÍTULO/AUTOR	DESCRIPCIÓN (ISBN/EDITORIAL/AÑO)/JUSTIFICACIÓN	VALOR UNITARIO	CANTIDAD	VALOR TOTAL
Manual de estabilidad/(INVIAS)	Bibliografía	\$ 80.000,00	1	\$ 80.000
				\$ -
				\$ -
VALOR TOTAL PRESUPUESTO DE BIBLIOGRAFÍA PARA EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN				\$ 80.000
6. CONSOLIDADO GENERAL PARA EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN				
ÍTEM		VALOR TOTAL		
1. MATERIALES		\$ 80.000,00		
2. EQUIPOS Y SOFTWARE		\$ -		
3. VIAJES Y SALIDAS DE CAMPO		\$ 100.000,00		
4. ASESORÍAS TÉCNICAS		\$ -		
5. BIBLIOGRAFÍA		\$ 80.000,00		
VALOR TOTAL PRESUPUESTO		\$ 260.000,00		

Fuente: Elaboración Propia

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

7.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA PARA LAS MODELACIONES.

Las selecciones de los parámetros geotécnicos utilizados en el desarrollo de este trabajo se basan en las investigaciones realizada por Bowles, por el ingeniero Manuel García López entre otros, los cuales se encuentran totalmente desglosados con la respectiva fuente bibliográfica en el Anexo 1. Sin embargo, para el desarrollo de las modelaciones en la Tabla 8 se presentan los rangos de valores para suelos coluviales con los que se desarrollaran las modelaciones.

Los parámetros geográficos, se basan en las geometrías desarrolladas en las investigaciones consultadas, así como en las geoformas que caracterizan las laderas nacionales y en los aportes de experiencia del director del trabajo de grado. En la Tabla 7 se definen los parámetros que se utilizaran para las modelaciones.

Tabla 7 Parámetros definidos para las modelaciones

PARÁMETROS INICIALES PARA LAS MODELACIONES						
Profundidades de falla (m)	3	6	9	12	15	
Ángulos internos del talud (°)	15	20	25	30	35	40
Ángulos externos del talud (°)	15	20	25	30	35	40
Relaciones de presiones de poros	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	
Fuerzas sísmicas	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	

Fuente: Elaboración propia

Los desarrollos de las modelaciones se realizaron bajo condición estática y condición pseudoestática, para las todas las posibles combinaciones geométricas analizadas. Se establece la necesidad de analizar el comportamiento de los parámetros geotécnicos para las diferentes profundidades de falla, cumpliendo el $FS=1$.

Primero se definieron los rangos para los ángulos internos y externos de un talud de suelo coluviales de acuerdo a el análisis retrospectivo realizado sobre los diferentes datos recolectados. De lo cual se puede determinar un rango de valores máximos y mínimos como aparecen en la Tabla 8.

Tabla 8 Resumen de rangos máximos y mínimos de los parámetros geo mecánicos.

Cohesion KN/m ² (C)		Angulo (°) (Ø)		Peso Unitario (γ _{sat}) KN/m ³	
Minimo	Maximo	Minimo	Maximo	Minimo	Maximo
0	150	9	48	17	23

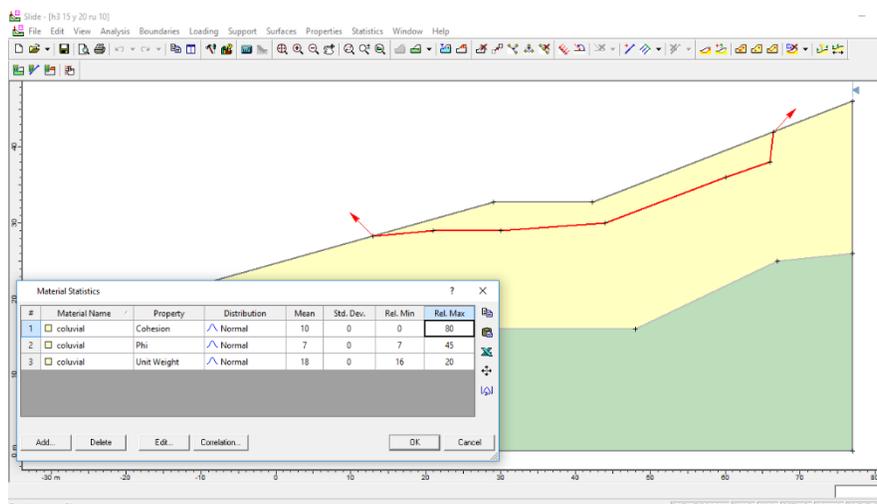
Fuente: Elaboración propia

Los datos del análisis retrospectivo realizado, está basado en los ensayos de compresión encofinada, ensayo de penetración estándar, los cuales indicaron que los parámetros geo mecánicos del suelo, cuentan con un rango de variación muy pequeño. Se identificó que para taludes de ángulos θ 40 y β 40 y profundidades de falla de 15 metros, no cuenta con una relación de parámetros geotécnicos dentro de los rangos determinados en Tabla 8.

7.2. ELABORACIÓN DE GRAFICAS Y ANÁLISIS DE ECUACIONES RESISTENCIA NORMALIZADA

Para el desarrollo de las modelaciones se trabajó mediante un análisis de sensibilidad, el cual permitió definir los rangos mínimos y máximos de los parámetros geotécnicos del terreno dentro del programa, como se muestra en la Figura 12.

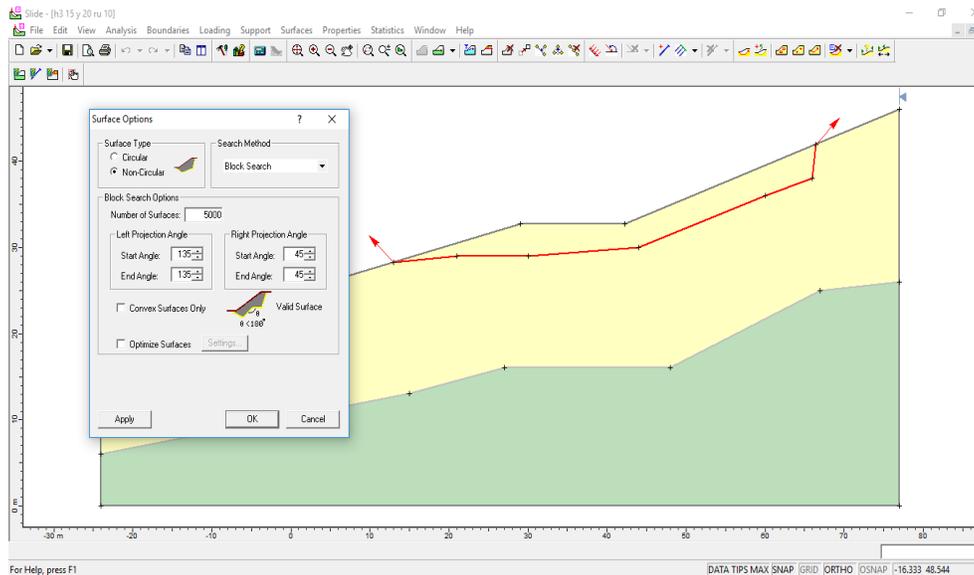
Figura 12 Rangos de análisis de sensibilidad



Fuente: Elaboración propia

Para el desarrollo de las modelaciones se trabajó con el método de equilibrio límite de Bishop, y superficies de fallas circulares, sin embargo, al realizar las primeras modelaciones se identifica que no es posible obtener un resultado para cada configuración geométrica, a las profundidades de falla planteadas, por tanto, se plantean un análisis de superficies de falla no circulares, para cada profundidad de falla en la Figura 13, presentan las opciones trabajadas dentro de las modelaciones.

Figura 13 Superficies de falla



Fuente: Elaboración propia

Para la elaboración de las gráficas se plantean las ecuaciones de resistencia normalizada, que relacionen los parámetros geotécnicos del suelo y los parámetros físicos de los taludes a media ladera con la profundidad de falla.

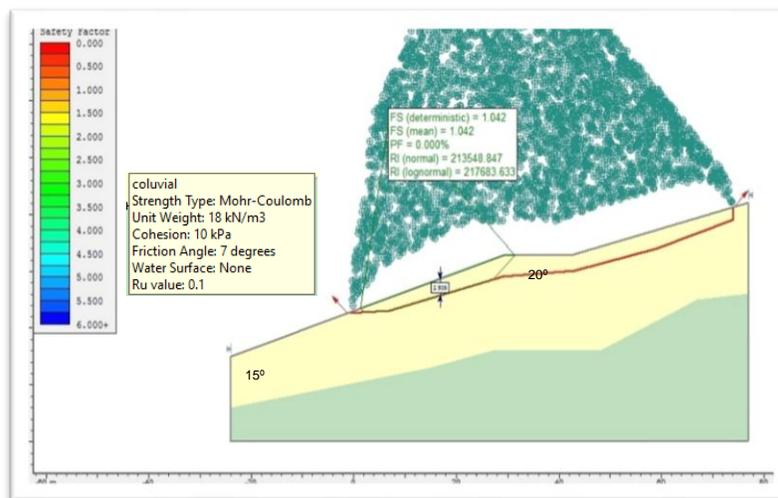
Se plantea el análisis de datos para todas las configuraciones posibles dentro de los parámetros geométricos y geotécnicos, estas combinaciones dejan como resultados los parámetros geotécnicos necesarios para cumplir el factor de seguridad $FS=1$, los resultados de las modelaciones se presentan en el Anexo 2 indicando las respectivas matrices de acuerdo a las profundidades de falla.

Segundo se determinaron geometrías de taludes con ángulos internos y externos sobre el corredor vial desde los 15° hasta los 40° . A partir de los cuales se puede establecer una relación directa entre los mismos, cuando los dos ángulos aumentan, la falla es más profunda si se analiza como falla circular, pero si se analiza

estableciendo la profundidad de falla como una constante, genera que los parámetros geo mecánicos del suelo aumenten para cumplir el factor de seguridad $FS=1$. Realizando una comparación en la Figura 14 se observa un talud con ángulos $\theta 15$ y $\beta 20$ en condición estática, la cohesión tiene un valor de 10KPa y ángulo de fricción de 7° y una profundidad de falla de 3 metros en la

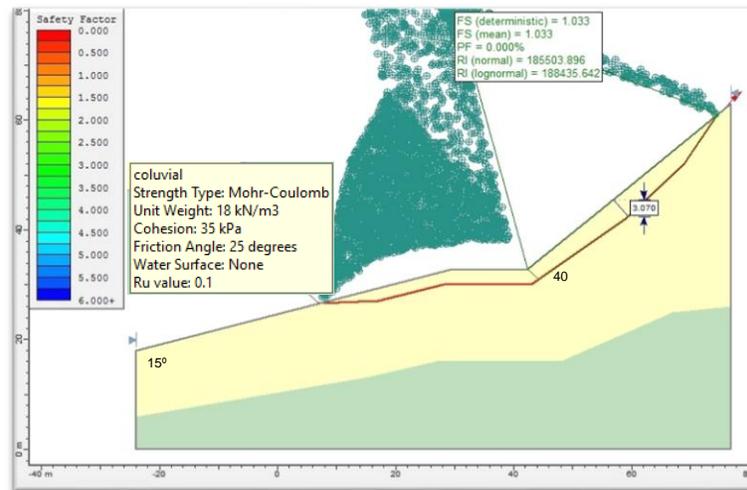
Figura 15. Se observa un talud de $\theta 15$ y $\beta 40$ con cohesión de 35 KPa y ángulo de fricción de 25° , profundidad de falla de 3 metros, se puede identificar la variación en los parámetros geo mecánicos del suelo cuando aumenta la inclinación del talud.

Figura 14 Talud $\theta 15$ y $\beta 20$ Ru .10 sin sismo



Fuente: Elaboración propia

Figura 15 Talud ϕ 15 y β 40 Ru .10 sin sismo



Fuente: Elaboración propia.

Los mecanismos de falla de los taludes analizados se determinaron con superficies circulares y superficies no circulares. A partir del cual se identificó que la falla circular depende de los ángulos del talud y solo permite establecer a una profundidad de falla, limitando así los resultados para las gráficas y correlaciones. Por tal razón se analizan los taludes con fallas no circulares donde se establece la profundidad de falla en un rango de (3 a 15 metros) variando los parámetros geo mecánicos para llegar cumplir el factor de seguridad.

Bajo condiciones sísmicas estáticas un talud es estable, es decir que las fuerzas resistentes son mayores a las fuerzas deslizantes, en condición pseudoestática las fuerzas externas influyen de manera directa en la resistencia interna del suelo. A causa de esto el análisis sísmico y configuraciones geométricas de cada talud se analizaron de manera conjunta con el fin de establecer el comportamiento de los parámetros geotécnicos cuando el suelo es sometido a condiciones sísmicas, sin alterar la geometría del talud. Lo cual genera que las fuerzas deslizantes se aumenten y provoquen una inestabilidad del talud. Para cumplir con el factor de seguridad se variaron los parámetros geo mecánicos dentro de los rangos obtenidos en el análisis retrospectivo mencionado en la Tabla 8.

Las condiciones de los taludes analizados se establecieron para trabajar con el método de talud infinito, dado que es más frecuente en laderas naturales y taludes de corte, en condición estática el comportamiento de la superficie de falla de los taludes con un grado de saturación Ru, depende de los parámetros geotécnicos y geométricos del talud, por tanto, se establecieron dos ecuaciones de resistencia

normalizada que permitan relacionar los parámetros físicos y mecánicos ya mencionados.

$$(C * \tan \theta) / \gamma).$$

Ecuación 1

C: Cohesión.

Tan θ : Tangente del ángulo interno del talud

γ : peso específico del suelo

En la ecuación 1 se relacionan la cohesión y peso específico con el ángulo interno del talud, con la cual se propone evaluar el comportamiento del talud, si el peso específico no varía y el ángulo aumenta proporcionalmente. En la Tabla 9 se indican los resultados de la resistencia normalizada para un talud con un ángulo θ de 15° y una profundidad de falla de 3 metros, se puede evidenciar que la resistencia normalizada aumenta a medida que aumenta la cohesión del terreno y esta a su vez aumente si se varía el ángulo β , a pesar de mantener constante el ángulo θ y la profundidad de falla. En la Tabla 10 se puede identificar que la resistencia normalizada es mayor que la presentada en la Tabla 9, indicando que la profundidad de falla aumenta generando que la cohesión aumente de manera proporcional de acuerdo a las condiciones geométricas y a las condiciones de saturación.

Tabla 9 Resistencia Normalizada ecuación 1. H 3 m., θ 15 y β variable

θ	β	RESISTENCIA NORMALIZADA $(C * \tan \phi) / \gamma$					
		H	RU .10	RU .20	RU .30	RU .40	RU .50
15	15	3	0,09	0,10	0,10	0,10	0,12
15	20	3	0,15	0,15	0,15	0,16	0,18
15	25	3	0,22	0,19	0,19	0,21	0,28
15	30	3	0,22	0,22	0,24	0,25	0,28
15	35	3	0,30	0,28	0,31	0,33	0,37
15	40	3	0,34	0,34	0,34	0,36	0,43

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10 Resistencia Normalizada ecuación 1. H 15 m., θ 15 y β variable

θ	β	RESISTENCIA NORMALIZADA $(C \cdot \tan \phi) / \gamma$					
		H	RU .10	RU .20	RU .30	RU .40	RU .50
15	15	15	0,28	0,27	0,25	0,27	0,33
15	20	15	0,28	0,28	0,27	0,28	0,34
15	25	16	0,30	0,30	0,27	0,31	0,36
15	30	15	0,31	0,30	0,28	0,33	0,37
15	35	15	0,33	0,31	0,30	0,36	0,39
15	40	15	0,34	0,33	0,30	0,39	0,40

Fuente: Elaboración propia.

$$(C \cdot \tan \beta) / \gamma.$$

Ecuación 2

C: Cohesión.

Tan β : Tangente del Angulo de fricción del terreno.

γ : peso específico del suelo

La ecuación 2, relaciona los parámetros geotécnicos del terreno, bajo condiciones geométricas que varían gradualmente pero que no se encuentran implícitas dentro de la ecuación, realizando un análisis de los resultados de resistencia normalizada para un talud con ángulo θ 25°, profundidad de falla 3 metros como se indica en la Tabla 11, se identifica que cuando el ángulo β aumenta, la cohesión y el ángulo de fricción del terreno aumenta, debido a que aumenta la pendiente del terreno.

Tabla 11 Resistencia Normalizada ecuación 1. H 3 m., θ 25 y β variable

θ	β	RESISTENCIA NORMALIZADA $C \cdot \tan \beta / \gamma$					
		H	RU .10	RU .20	RU .30	RU .40	RU .50
25	15	3	0,13	0,14	0,16	0,18	0,12
25	20	3	0,10	0,12	0,12	0,14	0,17
25	25	3	0,09	0,09	0,10	0,11	0,12
25	30	3	0,15	0,15	0,13	0,14	0,16
25	35	3	0,13	0,13	0,15	0,17	0,18
25	40	3	0,19	0,17	0,18	0,19	0,19

Fuente: Elaboración propia.

Se procedió a realizar las gráficas relacionando la profundidad de falla y los valores de resistencia normalizada obtenidos a partir de las ecuaciones 1 y 2. Se

determinó que la altura h en la zona de falla ($FS=1$), presenta una variación lineal con la resistencia en condición estática y bajo un grado de saturación que aumenta gradualmente, tal como se observa en el Gráfico 1.

7.3 ANÁLISIS DE CORRELACIONES

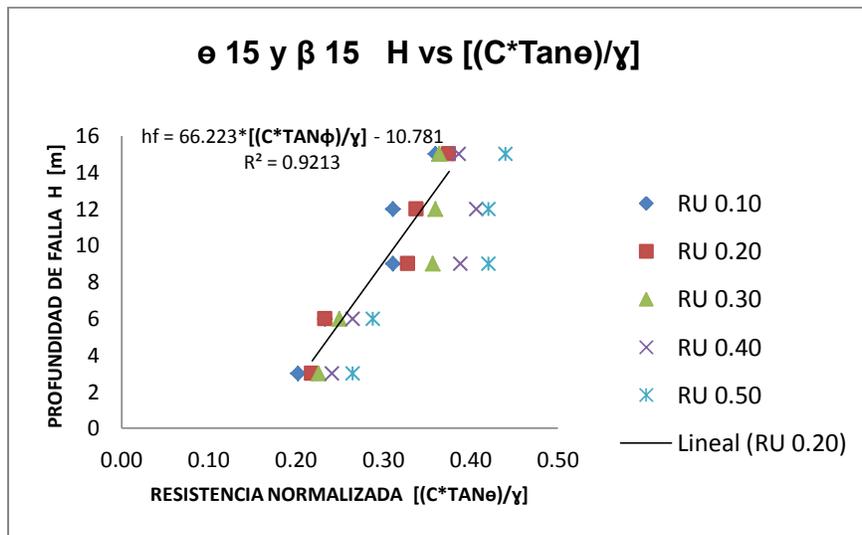
Los resultados obtenidos a partir de las ecuaciones se grafican vs las alturas de profundidad de falla, los valores de correlación se analizan de manera individual con el objetivo de establecer el comportamiento del talud cuando es sometido a varios casos de saturación. En el anexo 3 se presentan las gráficas obtenidas en condiciones estáticas, indicando según el nivel de saturación la correlación más alta para la geométrica que se analiza en cada gráfica, generalmente se analiza con un valor de R_u : 0.50 siendo el mayor valor de saturación, pero en algunos casos la correlación más alta se presenta en un R_u : 0.20, lo cual permite indicar que solo se puede aplicar la ecuación si el nivel de saturación es igual o menor al mencionado dentro de la gráfica. En el anexo 4 se presentan las gráficas obtenidas bajo el análisis en condición pseudoestática organizado según la intensidad de la fuerza sísmica, y el nivel de saturación como en condición estática.

Se identifica nuevamente una proporcionalidad directa entre la altura de falla y la resistencia normalizada, como se puede ver en el gráfico 1. Se observa un talud con ángulos más acentuados, comparados con el Gráfico 2, indicando que cuando la resistencia normalizada aumenta, la profundidad de falla aumenta de manera gradual, según los parámetros geométricos. Mediante un análisis de regresión, se identifica que los parámetrograficos geométricos se comportan de manera independiente y los parámetros geotécnicos del suelo como variables dependientes, la ecuación $3h_f = 9,1339*((C*\text{Tan}\theta)/\gamma) - 9,5645$ Ecuación 3 permite obtener una altura de falla del talud h_f , en condición estática y con un grado de saturación máx. R_u 0,5.

$$h_f = 9,1339*((C*\text{Tan}\theta)/\gamma) - 9,5645$$

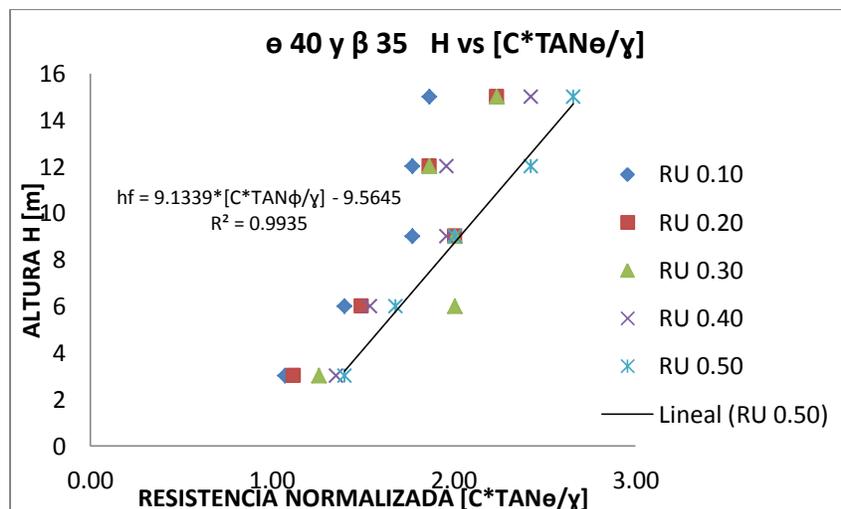
Ecuación 3

Gráfico 1 θ 15 y β 15 sin sismo (Profundidad de Falla vs Resistencia Normalizada)



Fuente: Elaboración propia.

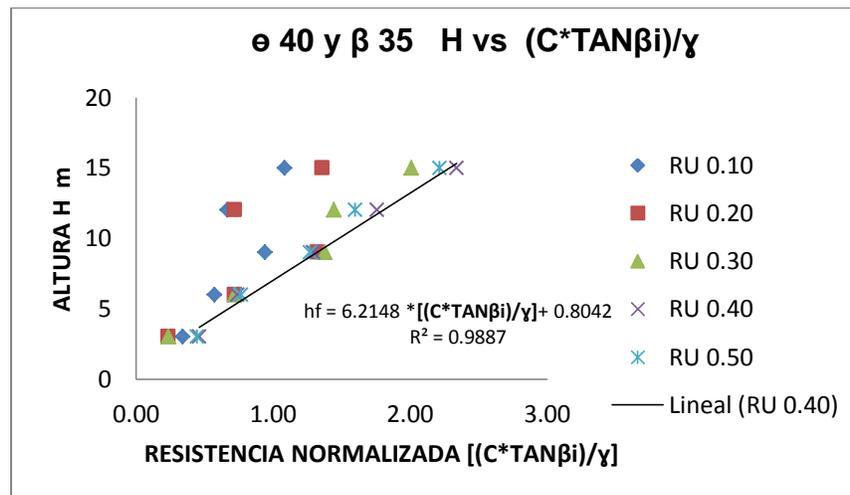
Gráfico 2 θ 40 y β 35 sin sismo (Profundidad de Falla vs Resistencia Normalizada)



Fuente: Elaboración propia.

Bajo la aplicación de la ecuación 2 se obtiene una relación de parámetros mecánicos con la profundidad de falla, de las cuales se identifica que a mayor grado de saturación menos es la resistencia normalizada del terreno, sin embargo, la correlación es más alta $R^2 = 0,988$, nuevamente en el Gráfico 3, se establece una relación lineal entre el ángulo en la interno talud, la cohesión y ángulo fricción del material en condición estática.

Gráfico 3 θ 40 y β 35, sin sismo (Profundidad de Falla vs Resistencia Normalizada)



Fuente: Elaboración propia.

$$hf = 6,2148 \times (C \cdot \text{TAN} \beta_i) / \gamma + 0,8042$$

Ecuación 4

La ecuación anterior, simplifica el análisis y permite predecir la altura de falla de un talud de suelo coluvial, a partir de los parámetros geotécnicos más elementales, con alto grado de confianza. Se observa de nuevo, que la condición más crítica está dada por la geometría del talud, por tanto, si el ángulo interno del talud es muy pequeño los parámetros geotécnicos son de muy bajo valor, y la resistencia normalizada es mínima.

Análisis pseudoestática

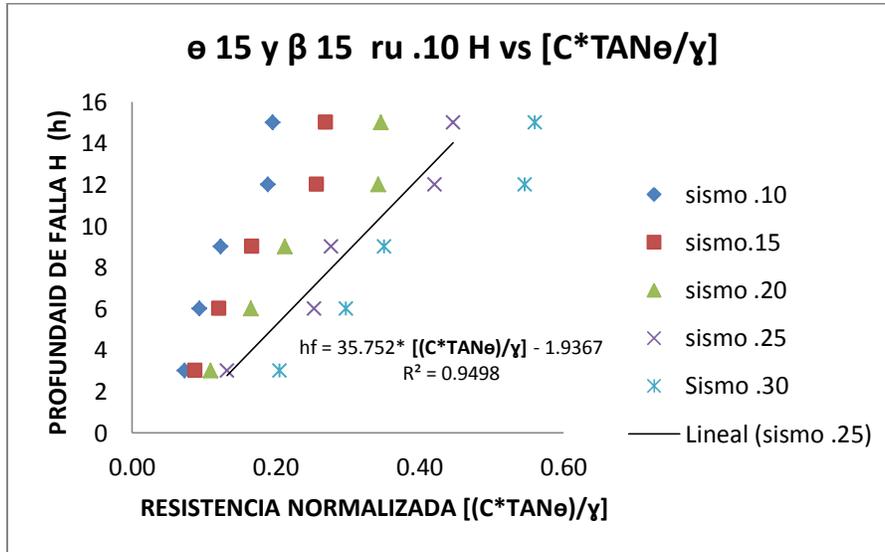
Se cuantifico el efecto de un sismo horizontal con valores entre 0.10 a 0.30, para las mismas configuraciones geométricas ya mencionadas en el capítulo 5.5., sin embargo se identifica que a medida que aumenta el ángulo interno del talud (θ) la correlación aumenta como se observa comparando el Gráfico 4 y el Gráfico 5, como resultado se determina una alta correlación $R^2 = 0.9793$ a partir del Gráfico 5, indicando que la resistencia normalizada y la altura de falla del talud tienen una

tendencia lineal, y se relacionan según la ecuación 5 que se presenta a continuación.

$$h_f = 4,1728 * [C * \tan \theta / \gamma] - 3,2716$$

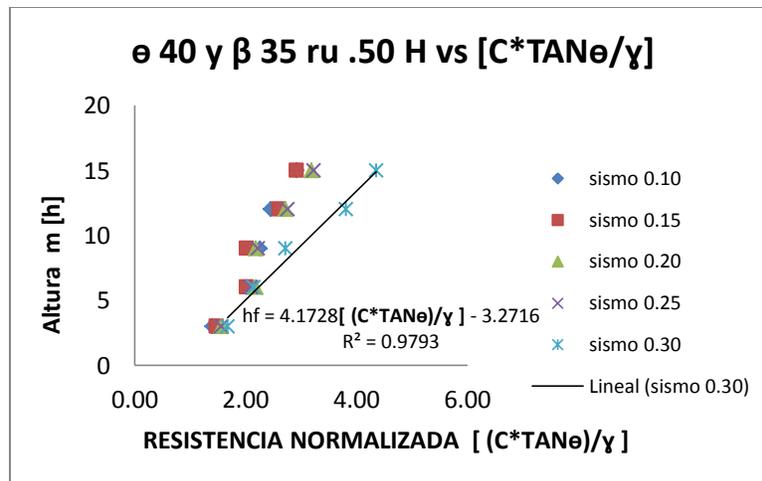
Ecuación 5

Gráfico 4 $\theta 15$ y $\beta 15$, $r_u: 0.10$, con sismo (Profundidad de Falla vs Resistencia Normalizada)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 5 $\theta 40$ y $\beta 35$, $r_u: 0.50$, con sismo (Profundidad de Falla vs Resistencia Normalizada)



Fuente: Elaboración propia.

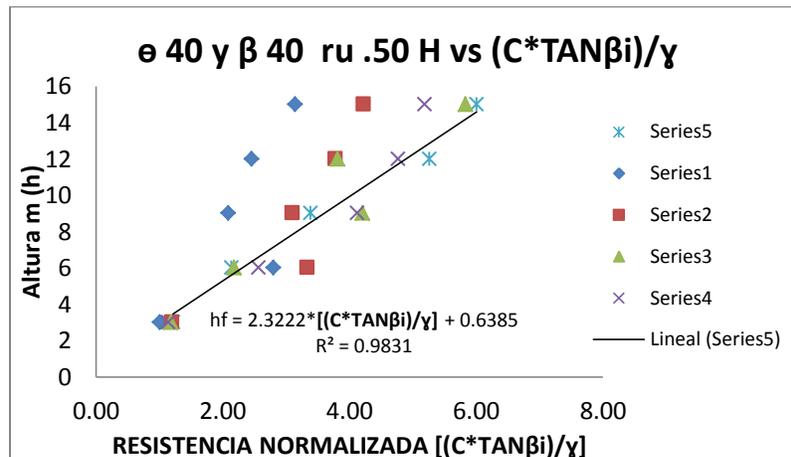
La resistencia normalizada (ecuación 2), analizada bajo condición pseudoestática, y como se muestra en el gráfico 6

Gráfico 6, presenta una tendencia lineal con una correlación de $R^2 = 0,983$ indicando que la profundidad de falla y la resistencia son parámetros adecuados para representar la susceptibilidad del modelo a la falla bajo las condiciones máximas geo mecánicas y geométricas propuestas para el análisis. Para la aplicación del modelo se plantea la ecuación 6 en la cual se relacionan los parámetros de cohesión, Angulo interno del material y el peso específico del material para determinar la profundidad de falla del talud.

$$h_f = 2,3222*((C*\text{Tan}\beta_i)/\gamma) + 0,6385$$

Ecuación 6

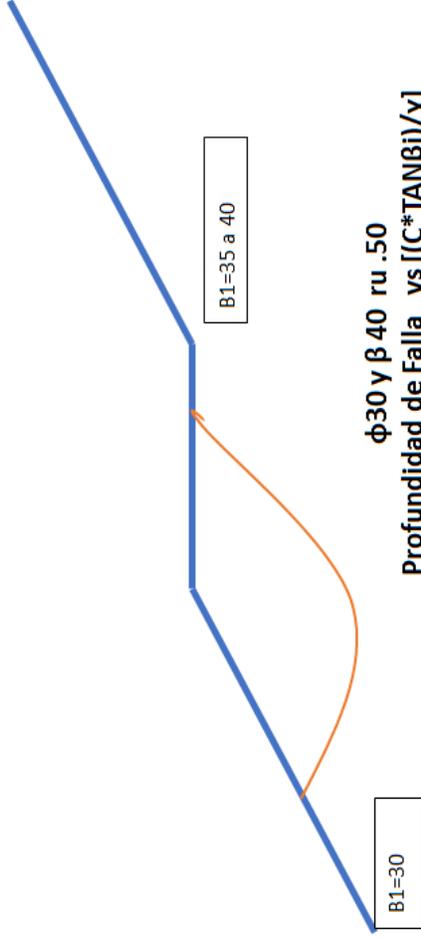
Gráfico 6 $\theta = 40$ y $\beta = 40$, con sismo (Profundidad de Falla vs Resistencia Normalizada)



Fuente: Elaboración propia.
 Aplicabilidad



VIA: BOGOTA VILLAVICENCIO K28+900-COVIANDES



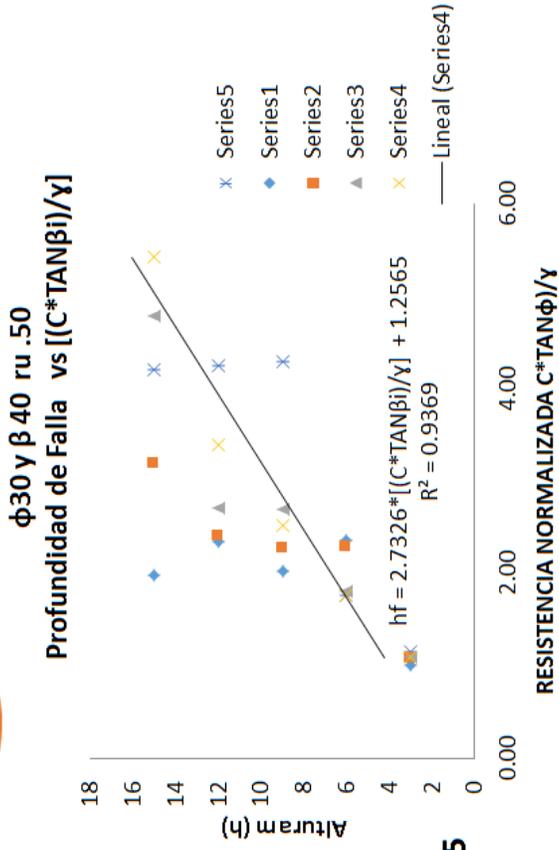
Superficie de falla
medida con
inclinómetro: 11 m.

CALZADA ANCHO: 9.50 M

C=1.50 ton

$$H_f = 2.7326x * [(150 * \text{TAN}(30)) / 18] + 1.2565$$

Hf = 13. m



8. CONCLUSIONES

Se desarrolló una metodología a partir de una serie de estudios de estabilización de taludes, que se realizan a lo largo de los corredores viales de montaña de la red vial nacional, la definición de los rangos de inclinaciones para los taludes (interior y exterior) de una vía a media ladera se basaron en las geo-formas que caracterizan la topografía de las laderas nacionales, determinadas a partir de los datos recolectados dentro del trabajo retrospectivo desarrollado.

Los antecedentes e información específica para el desarrollo de la investigación cuentan con un sin número de inquietudes, dado a que, a pesar de las muchas investigaciones sobre el comportamiento de los taludes bajo condiciones especiales, y determinaciones de los parámetros geotécnicos, no se cuenta con información puntual sobre análisis de estabilidad de taludes viales bajo la resistencia normalizada.

En el anexo 1. Se presentan los antecedentes tomados para el análisis retrospectivo, del cual se tomaron los datos para el resumen presentado en el numeral 7.1, estos rangos fueron utilizados de manera gradual en el análisis de las configuraciones geométricas, como resultado de estos análisis se permiten estimar los parámetros geotécnicos del suelo en una falla a partir de las configuraciones geométrica de deslizamiento, omitiendo un análisis detallado de estabilidad con una probabilidad muy baja de error.

En el desarrollo de las modelaciones se identifica el comportamiento de las correlaciones para las condiciones más críticas analizadas, observando que a medida que aumenta los ángulos de inclinación talud (externo e interno) y los parámetros geotécnicos, la correlación aumenta.

La implementación de este trabajo para un análisis de estabilidad de taludes viales está limitado a taludes de suelos coluviales con parámetros físicos como los mencionados en el numeral 7.1 y parámetros geotécnicos dentro del rango de valores establecidos.

A partir de las ecuaciones simplificadas presentadas en el numeral 7.3, se proponen criterios de evaluación de vulnerabilidad geotécnica de los corredores de montaña a media ladera estableciéndose como una herramienta para la gestión de riesgo.

Las ecuaciones planteadas, se deben aplicar a taludes de suelos coluviales los cuales permitan determinar su susceptibilidad de falla cuando es sometido a

condiciones externas como las analizadas, como resultado se podrían planificar la inversión y mejorar la infraestructura vial existente.

Se realiza la aplicabilidad de las ecuaciones sobre un corredor vial Villavicencio K28+900 COVIANDES, construido en los últimos años y sobre el cual se realizó una serie de estudios con elementos más precisos como el inclinómetro. Dejando como resultado una profundidad de falla de 11 metros, si se aplica el análisis de resistencia normalizada a partir de las ecuaciones planteadas en este trabajo se presenta una profundidad de falla de 13 metros, sin embargo no se conocía el valor exacto del peso específico del suelo por tanto se asumió como si fuera el mismo en los dos casos es decir que se puede presentar una variación entre (16 y 19) donde si está en el rango más bajo el valor es muy cercano al obtenido con el inclinómetro.

La aplicabilidad bajo condición pseudoestática, no sería real el análisis dado a que no se conoce el comportamiento de este talud específico bajo una condición extrema propuesta en el trabajo, sin embargo se tramita la solicitud de esta información para poder realizar un análisis más detallado al respecto.

9. RECOMENDACIONES

La investigación realizada, fue basada en información teórica recopilada de las principales fuentes que se vincularon con el tema, sin embargo, la aplicación de las ecuaciones determinadas dentro de este trabajo, no fueron aplicadas a ningún caso real, se recomienda realizar el análisis de estabilidad de taludes, utilizando las ecuaciones y realizar una comparación con un análisis de estabilidad más detallado.

La aplicación de este trabajo se enfoca no solo en laderas, o taludes naturales pues permite establecer el comportamiento mecánico de los suelos coluviales si estos son usados como llenos viales, es decir que se podría establecer una aproximada relación de costos de acuerdo a los parámetros geotécnicos que se determine, con el fin de proyectar futuras inversiones.

REFERENCIAS

EDISON F. GARZÓN M., "Propuesta Metodológica para la Evaluación de la Amenaza de Corredores viales de montaña de la red vial nacional", Cartagena Colombia, 5 y 7 de octubre.

BETRÁN M. Lisandro, RODRIGUEZ A. Jorge, CHAVEZ C. Mauricio, Elementos del Impacto Ambiental, Producido por los Deslizamientos de Taludes Viales Colombianos Universidad Nacional, Bogotá Colombia, 2011, p. 5

JAIME SUAREZ D. Deslizamientos análisis Geométrico, Bucaramanga Santander, tomo 4,1993 p. 2-33

Duncan J.M., Wright S. G. "Soil Strength and Slope Stability". John Wiley and Sons.Inc. Hoboken. New Jersey, 2005, p. 297

CONFLICTOS TERRITORIALES Y ACUERDOS DE PAZ EN COLOMBIA,(1, 25 – 26, Febrero,2016, 25,Universidad Nacional de Colombia Bogotá).

AUTOPISTA DE LA PROSPERIDAD, Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) de Medellín.

JORGE ALEJANDRO MORENO SALGADO Ajuste a los parámetros de resistencia de depósitos de coluviones mediante correlaciones entre ensayos de laboratorio, exploración geotécnica y retro cálculo,2013, Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá Colombia.

COLOMBIA.UNIDAD NACIONAL PARA LA GESTION DEL RIESGO DE DESASTRES. Ley 1523 (24, Abril, 2012) Por el cual se adopta la política nacional del gestión del riesgo de desastres y se establecen el sistema nacional de gestión del riesgo de desastres y se dictan otras disposiciones.

COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Decreto 1807 (19, Septiembre, 2014). Por el cual se reglamenta el artículo 189 del decreto Ley 019 de 2012, se establecen las condiciones y las escalas de detalles para la incorporación de la gestión de riesgo en la revisión de contenidos de medianos y largo plazo de los planes de ordenamiento territorial municipal.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (1982) "Engineering and Construction in Tropical and Residual Soils", Proceedings of the ASCE Engineering Division Specialty Conference, Honolulu Hawaii, January 11-15, 1982, Published by ASCE, New York.

10. ANEXOS

ANEXO 1

TABLAS PARA EL ANÁLISIS RETROESPECTIVO DE LOS PARAMETROS
GEOTÉCNICOS.

ANEXO2

MATRICES CON INFORMACIÓN DE PARAMETROS GEOTÉCNICOS DEL
SUELO DE ACUERDO A LA PROFUNDIDAD DE FALLA.

ANEXO 3

DATOS Y GRAFICAS DE ACUERDO A ECUACIONES DE RESISTENCIA
NORMALIZADA EN CONDICION ESTATICA.

ANEXO 4

DATOS Y GRAFICAS DE ACUERDO A ECUACIONES DE RESISTENCIA
NORMALIZADA EN CONDICION SEUDOESTÁTICA.