

**Análisis de la amenaza por deslizamiento para la vía curos-guaca con base en la  
metodología de taludes naturales**

**Cristian Fernando Arenas Gómez**

**Dayan Nicolay Ariza Tobar**

**Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil**

**Director**

**Hebenly Celis Leguizamo**

**MSc. en Ingeniería Civil**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**Bucaramanga**

**2020**

### **Agradecimientos**

Gracias a Dios, primero que todo, por darnos salud y vida para terminar nuestros estudios, y que la entrega de este proyecto sea posible. Después de él, a nuestra familia por ser ese apoyo y promotores durante este proceso educativo. A la Universidad Industrial de Santander y profesores por dejarnos pertenecer a su alma mater, a la cual nos sentimos orgullosos por aportarnos los conocimientos necesarios para el desarrollo de nuestra vida profesional y, por último, pero no menos importante a nuestro tutor el Ingeniero Vladimir Merchán y geólogo Jean Paul Diaz, además de todas las personas y entidades que nos aportaron sus conocimientos e información base para el desarrollo de la presente investigación.

**Contenido**

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Introducción .....   | 15          |
| 1. Objetivos .....   | 17          |
| 1.1 Objetivo General.....  | 17          |
| 1.2 Objetivos específicos .....                                  | 17          |
| 2. Marco Teórico.....  | 18          |
| 2.1 Método de taludes naturales.....                             | 18          |
| 2.2 Factores que rigen la estabilidad de laderas naturales ..... | 19          |
| 2.2.1 Movimientos de masa. ....                                  | 19          |
| 2.2.2 Geomorfológicos.....                                       | 19          |
| 2.2.3 Internos. ....   | 20          |
| 2.2.4 Climáticos. ....   | 20          |
| 2.3 Aspectos relevantes del método.....                          | 21          |
| 2.4 Macro geotecnia.....   | 22          |
| 3. Metodología .....   | 22          |
| 3.1 Diagrama metodológico del método.....                        | 22          |
| 3.2 Recolección de la información.....                           | 23          |
| 3.2.1. Planos topográficos.....                                  | 23          |
| 3.2.2 Planos geológicos.....                                     | 24          |

|  |    |
|--|----|
| 3.2.3 Estaciones Pluviométricas. ....  | 24 |
| 3.3 Microzonificación sísmica .....  | 25 |
| 3.4 Delimitación de taludes y cálculo de parámetros geométrico .....           | 25 |
| 3.5 Corrección del valor “b” .....   | 27 |
| 3.6 Determinación de las propiedades geotécnicas.....                          | 29 |
| 4. Evaluación de la estabilidad y deslizamiento .....                          | 30 |
| 4.1 Evaluación del factor de seguridad Incondicional .....                     | 30 |
| 4.2. Evaluación del factor de seguridad por sismo .....                        | 35 |
| 4.3 Evaluación del factor de seguridad por lluvia.....                         | 39 |
| 4.3.1.1 Asignación de valores de CN.....                                       | 39 |
| 4.3.1.2 Tipo del suelo.....  | 40 |
| 4.3.1.3 Uso del suelo.....   | 41 |
| 4.3.1.4 Asignación del CN.....   | 43 |
| 5.3.2 Tiempo de retorno y Precipitación Crítica.....                           | 43 |
| 4.3.2.1 Inventario de deslizamientos.....                                      | 43 |
| 4.3.2.2 Curvas de masa. ....   | 44 |
| 4.3.2.3 Determinación del tiempo de retorno y precipitación crítica.....       | 45 |
| 4.3.2.4 Determinación de parámetros de lluvia. ....                            | 46 |
| 4.3.3 Calculo del factor de seguridad y probabilidad de falla por lluvia. .... | 48 |
| 4.4 Evaluación del factor de seguridad por sismo y lluvia. ....                | 50 |
| 4.5 Evaluación del factor de seguridad total .....                             | 54 |
| 5. Correlación de Datos.....   | 58 |
| 5.1 Kilómetro 12.....  | 58 |

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 5.2 Kilómetro 22 .....           | 59 |
| 5.3 Kilómetro 36 .....           | 61 |
| 5.4 Kilómetro 42 .....           | 62 |
| 6. Conclusiones .....            | 64 |
| Referencias Bibliográficas ..... | 65 |

## Lista de Figuras

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Figura 1. Distribución de la precipitación anual en la estación Tope El .....  | 21          |
| Figura 2. Diagrama Metodológico del Método de taludes Naturales .....          | 23          |
| Figura 3. Visor de planos topográficos. ....                                   | 23          |
| Figura 4. Mapa geológico del departamento de Santander.....                    | 24          |
| Figura 5. Visor de estaciones pluviométricas. ....                             | 25          |
| Figura 6. Coeficiente Aa y Av de la NSR 10.....                                | 25          |
| Figura 7. Delimitación de los taludes .....                                    | 26          |
| Figura 8. Grafico tipo para taludes .....                                      | 27          |
| Figura 9. Grafica de presión de poros normalizados vs Tan BLD.....             | 29          |
| Figura 10. Grafica peso unitario total vs Tan BLD .....                        | 30          |
| Figura 11. Datos del universo de taludes .....                                 | 30          |
| Figura 12. Mapa de zonificación en condición incondicional a largo plazo ..... | 34          |
| Figura 13. Diagrama de flujo factor de sismo.....                              | 35          |
| Figura 14. Efecto de transformación del talud por sismo .....                  | 35          |
| Figura 15. Mapa de zonificación en condición de sismo a largo plazo .....      | 39          |
| Figura 16. Formaciones geológicas involucradas en el trazado .....             | 40          |
| Figura 17. Mapa de uso de suelo .....  | 41          |
| Figura 18. Uso de suelo involucrados en el trazado .....                       | 42          |

|  |    |
|--|----|
| Figura 19. Curva de masa acumulada en Tope El .....  | 45 |
| Figura 20. Mapa de zonificación en condición de lluvia a largo plazo .....                     | 50 |
| Figura 21. Geometría de transformación del talud por efecto sismo.....                         | 51 |
| Figura 22. Mapa de zonificación en condición lluvia más sismo a largo plazo .....              | 53 |
| Figura 23. Mapa de zonificación en condición de falla total a corto plazo .....                | 57 |
| Figura 24. Mapa de zonificación en condición de falla total a mediano plazo.....               | 57 |
| Figura 25. Mapa de zonificación en condición de0 falla total a largo plazo .....               | 57 |
| Figura 26. Registro fotográfico de campo en el Km 12.....                                      | 58 |
| Figura 27. Localización del talud asociado al evento presentado en cercanías del kilómetro 12. | 59 |
| Figura 28. Registro fotográfico de campo en el Km 22.....                                      | 60 |
| Figura 29. Localización del talud asociado al evento presentado en cercanías del kilómetro 22. | 60 |
| Figura 30. Registro fotográfico de campo en el Km 36.....                                      | 61 |
| Figura 31. Localización del talud asociado al evento presentado en cercanías del kilómetro 36. | 61 |
| Figura 32. Registro fotográfico de campo en el Km 42.....                                      | 62 |
| Figura 33. Localización del talud asociado al evento presentado en cercanías del kilómetro 42. | 63 |

**Lista de Tablas**

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Tabla 1. Periodo de tiempo tomados en el análisis de MTN Curos.Guaca .....               | 31          |
| Tabla 2. Hot para corto y mediano plazo .....  | 32          |
| Tabla 3. Rangos de los niveles de amenaza por MTN.....                                   | 34          |
| Tabla 4. Probabilidad de ocurrencia para sismo .....                                     | 38          |
| Tabla 5 Clasificación de las formaciones geológicas presentes en el área de estudio..... | 41          |
| Tabla 6. Nomenclatura INGEOCIM.....  | 43          |
| Tabla 7. Valores de CN asociados al uso de suelo .....                                   | 43          |
| Tabla 8. Factores críticos asociados a los deslizamientos .....                          | 46          |
| Tabla 9. Probabilidad de ocurrencia para evento lluvia.....                              | 49          |
| Tabla 10. Probabilidad de ocurrencia para evento lluvia más sismo.....                   | 52          |
| Tabla 11. Tiempo de retorno asociados al escenario de largo plazo .....                  | 53          |
| Tabla 12. Probabilidades de ocurrencia para los diferentes escenarios de tiempo .....    | 53          |
| Tabla 13. Propiedades del talud asociado al evento del Km12.....                         | 59          |
| Tabla 14. Propiedades del talud asociado al evento del Km22.....                         | 61          |
| Tabla 15. Propiedades del talud asociado al evento del Km36.....                         | 62          |
| Tabla 16. Propiedades del talud asociado al evento del Km42.....                         | 63          |

## **Lista de Apéndices**

Ver documentos adjuntos en el CD y pueden ser visualizados en la base de datos de la Biblioteca UIS

Apéndice A ARCGIS

Apéndice B taludes

Apéndice C Corrección del B de MTN

Apéndice D Factores de seguridad y probabilidad de falla de las evaluaciones

Apéndice E Determinación del CN

Apéndice F Analisis hidrologico

Apéndice G Tiempos de retorno –series

Apéndice H Incondicional

Apéndice I Sismo

Apéndice J Lluvia

Apéndice K Sismo+Lluvia

Apéndice L Total

Apéndice M Registro Fotográfico

## Resumen

**Título:** Análisis de la amenaza por deslizamiento para la vía curos-guaca con base en la metodología de taludes naturales \*

**Autor:** Cristian Fernando Arenas Gómez  
Dayan Nicolay Ariza Tobar \*\*

**Palabras Clave:** Taludes Naturales, Macro geotecnia, deslizamiento, Factores de seguridad.

### Descripción

Se presenta un análisis de deslizamiento de la vía que comunica a los municipios de Curos y Guaca por medio del método de taludes naturales (MTN) que fue desarrollado por los ingenieros Álvaro González y Thomas Shuk en (Shuk E., 1990) (Shuk E. & G.-G. A., 1993). El método tiene 4 ventajas importantes en el análisis como lo son: el aspecto geométrico ya que este es un indicador de estabilidad a través del tiempo, permite usar correlaciones con propiedades básicas y de resistencia para taludes colombianos, permite integrar en el análisis aspectos de sismo y lluvia como detonantes de falla y por último permite el cálculo de los factores de seguridad y probabilidad de ocurrencia plasmándolos gráficamente en un mapa para cada tipo de evaluación. Estos mapas tendrán una zona de análisis de 500 metros a cada lado de la vía y servirán de información secundaria y de apoyo para identificar zonas de probables deslizamientos permitiendo facilitar la identificación visual de las zonas críticas y asociarlas rápidamente a un punto geográfico sirviendo de fundamento para toma de decisiones posteriores. Adicionalmente es uno de los inputs para análisis de Amenaza-Vulnerabilidad y Riesgo. Por tanto, es de vital importancia complementarlos con información primaria de campo para ejecutar, orientar y coordinar acciones para la reducción de riesgo de desastres..

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Hebenly Celis Leguizamo MSc. en Ingeniería Civil

## Abstract

**Title:** Analysis of the landslide threat for the Curos-Guaca route based on the natural slope methodology \*

**Author:** Cristian Fernando Arenas Gómez  
Dayan Nicolay Ariza Tobar \*\*

**Key Words:** Natural slopes, Macro geotechnics, landslide, Safety factors

### Description

A landslide analysis of the road that communicates the municipalities of Curos and Guaca is presented through the method of natural slopes (MTN) that was developed by engineers Álvaro González and Thomas Shuk in (Shuk E., 1990) (Shuk E. & G.-G. A., 1993). The method has 4 important advantages in the analysis such as: the geometric aspect since this is an indicator of stability over time, allows correlations with basic and resistance properties for Colombian slopes, allows the integration of earthquake and rain aspects such as detonators of failure and finally allows the calculation of the safety factors and probability of occurrence by plotting them on a map for each type of evaluation. These maps will have an analysis area of 500 meters on each side of the road and will serve as secondary and supporting information to identify areas of probable landslides allowing to facilitate the visual identification of critical areas and quickly associate them with a geographical point serving as the basis for subsequent decision making. Additionally, it is one of the inputs for Threat Vulnerability and Risk analysis. Therefore, it is vitally important to complement them with primary field information to execute, guide and coordinate actions for disaster risk reduction in the specific area..

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Hebenly Celis Leguizamo MSc. en Ingeniería Civil

## Introducción

El estudio de la estabilidad de taludes y laderas es uno de los temas más críticos para Colombia, ya que el país cuenta con una serie de características que incrementan la amenaza por fenómenos de remoción en masa, como la geografía, el entorno sísmico y cambios climáticos acentuados recientemente por efectos del cambio climático. Por ejemplo, se han encontrado que el 96 % de los movimientos de masa son causados por condiciones meteorológicas, donde el 56% por precipitaciones prolongadas y el 37% por precipitaciones de corta duración (Shuk, 1999)

En este proyecto, se ha aplicado la Metodología de Taludes Naturales (MTN), propuesta originalmente por Shuk y González (Shuk, 1999) en la determinación de factores de seguridad y probabilidad de falla a gran escala ( $> 1: 2000$ ), para laderas. Esta metodología ha sido aplicada con éxito en los estudios de amenaza por deslizamientos en Bogotá en los años 1999 y 2016. Para este proyecto se escogió un sector de la vía Curos-Málaga, por ser uno de los corredores viales en Santander más afectados históricamente por deslizamientos.

La MTN, integra cuatro aspectos relevantes dentro del análisis:

- La condición geométrica de las laderas, en términos de altura y longitud, es un indicador de su condición de estabilidad en su historia geológica o incondicional. Taludes de gran altura y pendiente son representativos de una condición estable.
- A partir de las condiciones geométricas de las laderas, Shuk y González desarrollaron correlaciones con propiedades básicas y de resistencia para taludes colombianos (Shuk E. T. , 1990) (Shuk E. & G.-G. A., 1993) (Shuk, 1999)

- La metodología permite integrar el efecto de la lluvia y del entorno sísmico dentro del análisis.
- Se conjugan los elementos mencionados, dentro de un factor de seguridad y probabilidad de falla totales.

Una vez aplicada la metodología de análisis, se estableció un mapa de amenaza por deslizamiento para la zona de estudio y se realizó una visita de campo para comprobar el estado de los taludes y laderas aledaños a la vía. Se compararon los sitios críticos en campo con los Factores de seguridad y probabilidad de falla encontrados con la metodología obteniéndose una correlación satisfactoria.

A continuación, se presentan, los objetivos planteados en el proyecto, el detalle de la metodología empleada y los principales resultados

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Realizar una estimación de la amenaza por deslizamiento en los taludes y laderas de la vía Curos Guaca, mediante los factores de seguridad del método de taludes naturales (MTN).

### 1.2 Objetivos específicos

- Extraer, procesar e interpretar las propiedades mecánicas de los taludes estudiados a través del programa Álvaro J. González G(AJGG) el cual se alimenta de una base de datos constituida por más de tres mil taludes y laderas colombianas
- Elaborar un mapa de la zonificación de la amenaza por deslizamiento mostrando los puntos más críticos del tramo.
- Validar los resultados obtenidos con observaciones de campo realizadas en el tramo de estudio

## 2. Marco Teórico

### 2.1 Método de taludes naturales

La Metodología de taludes naturales está basada con la premisa básica que “La naturaleza es el mejor ensayo in-situ”. El método fue propuesto y desarrollado por el húngaro-colombiano el ingeniero Thomas Shuk E desde 1968 a 1999 como una manera de evaluar la estabilidad a gran escala estimando parámetros geotécnicos del material en las laderas. Estos parámetros incluyen densidad, resistencia, porosidad, parámetros de deformación, parámetros de presurización de masa, entre otros (Shuk, 1999).

Para el desarrollo de la metodología se necesitan planos topográficos, mapas geológicos y de suelos del lugar y la información pluviométrica.

Mediante una adecuada delimitación de niveles de medición de taludes naturales permite realizar un análisis por medio de la observación y medición organizada de parámetros geométricos cuantitativos como lo son longitud y altura promedios de los taludes, como se expresa en la formula (1) sustentada por Shuk en (Shuk, 1999)

$$H = a * L^b \quad (1)$$

$H =$  *Altura del talud*

$L =$  *Longitud del talud*

$a =$  *entero de la función potencial*

$b =$  *entero de la función potencial*

La MTN tiene una ventaja respecto a métodos similares de estudio ya que reduce el tiempo costo y elementos físicos y humanos requeridos ya que no requiere estudios como sondeos, ensayos de laboratorio.

## **2.2 Factores que rigen la estabilidad de laderas naturales**

Las laderas que han permanecido estables por muchos años pueden fallar en forma imprevista debido a cambios topográficos, sismicidad, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del suelo, meteorización o factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad (Alcocer S., Salinas, Echavarría, & Mendoza, 1996).

**2.2.1 Movimientos de masa.** Es el movimiento de sedimentos, sólidos residuales o masas de rocas que suceden en una pendiente, donde los materiales se vienen cuesta abajo por efectos de la gravedad (Coates, 1981), los cuales pueden variar según el volumen y el detonante de falla.

Los movimientos que usualmente son causados por las precipitaciones, son las avalanchas torrenciales y los deslizamientos y flujos de tierra. Los efectos del agua en los deslizamientos difieren dependiendo de la condición local del suelo y el proceso que originan la precipitación en cada área, donde las diferentes características de estas, originan diferentes movimientos de tierra. (Lara M., 2008)

**2.2.2 Geomorfológicos.** Está relacionado directamente con la topografía de la zona y la geometría involucrada además de tener en cuenta las discontinuidades y la estratificación del material que conforma la ladera (Lara M., 2008).

**2.2.3 Internos.** Relaciona las propiedades mecánicas de resistencia, deformabilidad y compresibilidad de rocas y los suelos, teniendo en cuenta los esfuerzos que actúan en el interior de una masa de material adema se ven afectados por desgastes ocasionados por la actividad humana. (Alcocer S., Salinas, Echavarría, & Mendoza, 1996)

**2.2.4 Climáticos.** Es necesario realizar una documentación de los derrumbes que se han producidos en la zona debido al agua, por medio de los valores pluviométricos de las estaciones que se encuentran en la zona y de esta manera indicar la lluvia crítica de falla, su duración y el tiempo de retorno, lo cual será de gran importancia para hallar la probabilidad de falla (V. M. T., 2002).

La lluvia es un factor detonante en la mayoría de los movimientos de masa ya que se ha demostrado que la lluvia acumulada precedente aumenta la presión de poros y disminuye los esfuerzos efectivos; el aumento de humedad desaparece la tensión capilar y presiones de poros negativa, donde el agua precipitada aumenta la masa del talud y haciendo así que se produzca la falla (Castellanos R., 1997).

También se ha demostrado que los deslizamientos aumentan en épocas de periodos invernales (noviembre, octubre, mayo y abril) tal como se demuestra en la figura 1 que contiene los datos de los años 2016, 2015, 2014, 2013 y 2012 en la estación TOPE EL.

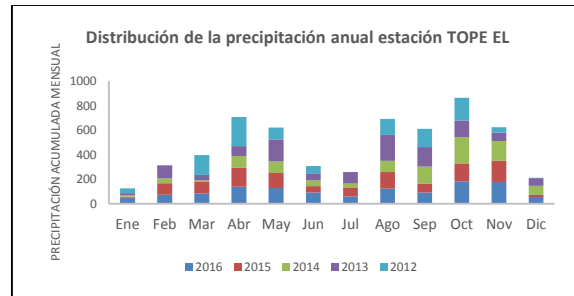


Figura 1. Distribución de la precipitación anual en la estación Tope El

También se ha observado que en muchos casos una precipitación mínima el día del evento ocasiona la falla y esto se produce porque el talud con anterioridad saturado y que la precipitación presentada provoco un desequilibrio interno produciendo la desestabilización de este. Donde ya se han encontrado relaciones entre la lluvia crítica y la lluvia de evento (Gonzalez, 2016)

### 2.3 Aspectos relevantes del método

La base fundamental de la metodología MTN es la geometría de los taludes. Existe una relación funcional entre  $L$  que es la proyección horizontal del talud y  $H$  que es la altura. Y esta relación funcional se puede definir por una función potencial de la forma como se representa en la formula (1) indica el perfil promedio de la superficie de la masa térrea. Esta línea de regresión corresponde a un  $F.S.=1.0$  y a una Probabilidad de falla  $P_f = 50\%$ .

Por tanto, en aquellos tramos con alturas superiores al promedio tenderán a ser más estables que aquellas que tengan alturas inferiores al mismo promedio. A partir de lo anterior, es factible deducir el  $F.S.$  y la  $P_f$  de los taludes asociados a esa ladera (Gonzalez, 2016).

## **2.4 Macro geotecnia**

El método de taludes naturales generalmente se encuentra ubicado en el campo de la macro geotecnia ya que su estudio tiene una población objetivo amplia, que se comprende grupo, familia, población y universo, la visión de su método de trabajo es de lo general a lo particular. La macro geotecnia a diferencia de la micro geotecnia no requiere trabajos de campo o laboratorio a excepción de la verificación de algunos aspectos y resultados (Shuk, 1999).

## **3. Metodología**

### **3.1 Diagrama metodológico del método**

A continuación en la figura 2 se presenta el diagrama metodológico que se siguió para el desarrollo del análisis de deslizamiento de la vía Curos-Guaca, desde la recolección de la información pertinente, Delimitación de los taludes de estudio, extracción de información geométrica (a y b), Correlaciones de propiedades a través del programa creado por González, cálculo de los diferentes parámetros de entrada para las diferentes alternativas de falla por último análisis de resultados y Mapas de la evaluación de la amenaza.

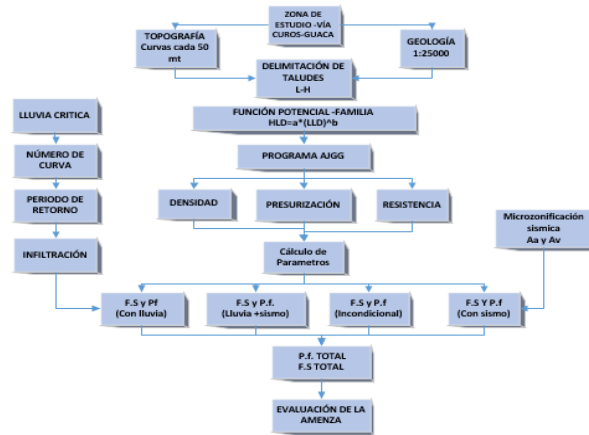


Figura 2. Diagrama Metodológico del Método de taludes Naturales

### 3.2 Recolección de la información

**3.2.1. Planos topográficos.** Por medio de la plataforma del Agustín Codazzi (GEOPORTAL) en donde se encuentran las diferentes planchas en formato shepfile, se procede a observar por medio del visor el nombre de las planchas que necesitamos y se identifican la 121III A y la 121IC como se ilustra en la figura 3, los cuales se descargan de dicha plataforma.

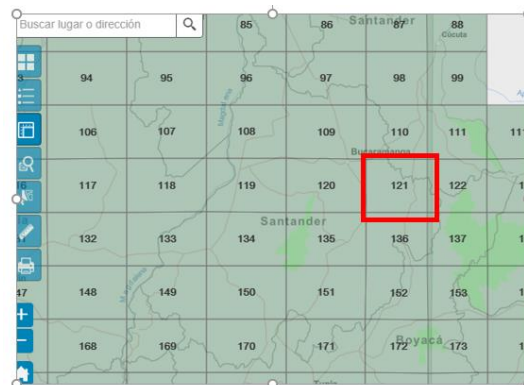
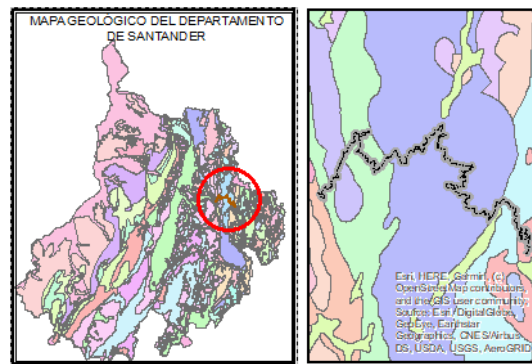


Figura 3. Visor de planos topográficos. Nota. Tomado del Instituto Geográfico Agustín Codazzi

**3.2.2 Planos geológicos.** Se solicitó al Servicio Geológico Colombiano un mapa del departamento de Santander en formato shepfile, donde se pudiese visualizar las diferentes formaciones geológicas y las fallas presentes en las cuales se encuentra la vía, donde dicha información es de gran importancia para la delimitación de los taludes y para el cálculo del número de curva en el análisis de la probabilidad de falla con lluvia.

En la Figura 4 se presenta la ubicación de la vía de estudio en el shepfile geológico del departamento de Santander



*Figura 4.* Mapa geológico del departamento de Santander

Nota. Tomado del Servicio Geológico Colombiano

**3.2.3 Estaciones Pluviométricas.** Por medio de la plataforma del IDEAM, se realizó la inspección de las estaciones que se encuentran dentro de la zona de estudio y se logra observar 2, las cuales se llaman TOPE EL y GUACA. La primera estación que se observa en la figura 5 se llama PRIMAVERA, ubicada en los Curos, la cual solo mide el caudal, por ello no se tuvo en cuenta y se realizó la solicitud de la información de las otras dos (2) desde el año que entro en funcionamiento hasta nuestros días.

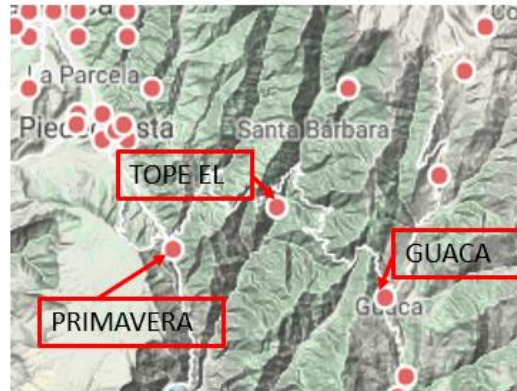


Figura 5. Visor de estaciones pluviométricas. Nota. Tomado del IDEAM

### 3.3 Microzonificación sísmica

Se tomarán los valores de  $A_a$  y  $A_v$  disponibles en el mapa de zonificación sísmica según la NSR y AIS como se puede observar en la tabla 1

| Ciudad       | $A_a$ | $A_v$ | Zona de Amenaza Sísmica |
|--------------|-------|-------|-------------------------|
| Arauca       | 0.15  | 0.15  | Intermedia              |
| Armenia      | 0.25  | 0.25  | Alta                    |
| Barranquilla | 0.10  | 0.10  | Baja                    |
| Bogotá D. C. | 0.15  | 0.20  | Intermedia              |
| Bucaramanga  | 0.25  | 0.25  | Alta                    |
| Calli        | 0.25  | 0.25  | Alta                    |
| Cartagena    | 0.10  | 0.10  | Baja                    |
| Cúcuta       | 0.35  | 0.30  | Alta                    |

Figura 6. Coeficiente  $A_a$  y  $A_v$  de la NSR 10. Nota. Tomado del NSR 10

### 3.4 Delimitación de taludes y cálculo de parámetros geométrico

De acuerdo con el método, en primera instancia se debe contar con unos planos topográficos con buena escala, donde para este estudio se usaron planchas 121III A Y 121I C del Instituto Colombiano Agustín Codazzi (IGAC), en las cuales se encuentra la vía de estudio a una escala

1:50.000, Por medio del programa Google earth se puso trazar la poli línea de la vía y después exportarla a shepfile para que tanto las curvas de nivel como la vía se vieran en el programa ARCGIS.

Teniendo la información necesaria, se procede a realizar la delimitación de taludes, las cuales deben contar con ciertas condiciones

- Curvas de nivel paralelas entre sí.
- Cercanía a la vía
- Que se encuentren en la misma formación geológica.
- Que la base del talud se encuentre en la curva de nivel de menor altura y de esta manera la corona tenga el valor de la cota mayor.

El método para la medición se llama “Método secuencial del intervalo de contorno acumulado(SCCIM), donde se trazan varias líneas perpendiculares, comenzando desde el menor contorno hasta el mayor, revisando las distancias entre ellos, en el cual se medirán las mayores, las menores y las distancias promedio, esto se realizará para cada línea perpendicular que se trace. Y se deberá indicar el trazo que tenga la mayor altura en el talud (HLD) y su respectiva distancia horizontal(LLD), proceso descrito en el anexo 1, en la Figura 6 se presenta un ejemplo del método secuencial para la delimitación de taludes homogéneos.

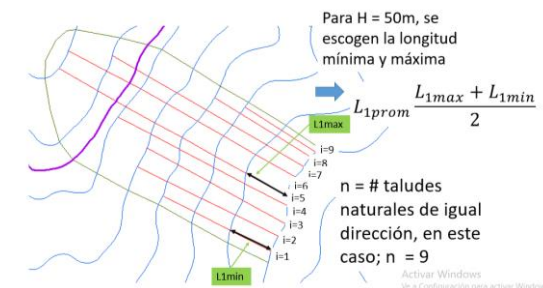


Figura 7. Delimitación de los taludes

Usando la distancia máxima, la mínima y la promedio entre las diferentes curvas de nivel del talud se procede a sacar la regresión potencial y de esta manera determinar la ecuación que más se ajusta al talud en estudio como se observa en la figura 7.

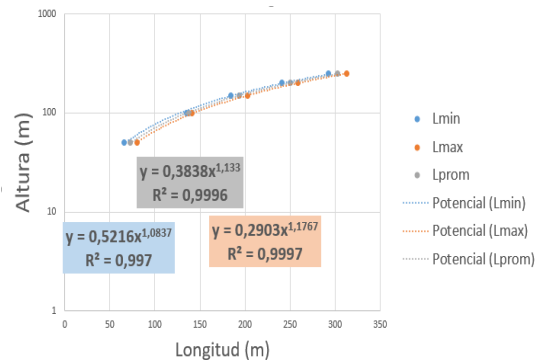


Figura 8. Grafico tipo para taludes

De esta manera se extraen los valores de  $a$  y  $b$ , que en este caso se usaran los valores promedio como se puede ver en el anexo 2, entre curvas de nivel, por lo cual se ajustaría la formula (1) originando para nuestro caso la formula (2), este proceso se realiza para todos los taludes homogéneos encontrados en el alineamiento de la zona de estudio.

$$H_{LD} = a * (L_{LD})^b \quad (2)$$

$H_{LD}$  = Altura limite superior de la familia

$L_{LD}$  = Longitud máxima de la familia

### 3.5 Corrección del valor “b”

En el caso de que el exponente  $b$  de la función potencial sea mayor que 1.0, el cálculo de las propiedades mecánicas e hidráulicas es poco confiable (Shuk, 1999) y el programa computacional

creado por el ingeniero González no admite valores de  $b > 1$  se tendrá que proceder a realizar una corrección y así disminuir dicho valor, por medio de las siguientes formulas, proceso que se explica en el anexo 3

- Recalcular la longitud del límite superior con los valores de  $a$  y  $b$  originales, como se expresa en la formula (3)

$$L_{LF} = \left[ \frac{H_{LD}}{a * L_{LD} \left(\frac{-1}{b}\right)} \right]^{\left(\frac{b}{1+b^2}\right)} \quad (3)$$

$L_{LF}$  = Longitud limite superior recalculada

- Calcular la altura del límite superior a partir de LLF de los valores de  $a$  y  $b$  originales, teniendo el mismo fundamento de la formula (1)

$$H_{LF} = a * (L_{LF})^b \quad (4)$$

$H_{LF}$  = Altura limite superior recalculada

- Calculamos el nuevo valor de  $b$ , expresada en la formula (5).

$$b^* = \frac{1}{b} \quad (5)$$

$b^*$  = constante "b" recalculada

- Se calcula el nuevo valor de  $a$  con los valores de HLF Y LLF y el nuevo valor de  $b$ , por medio de un despeje muy simple en la expresión (6)

$$a^* = \frac{H_{LF}}{(L_{LF})^{b^*}} \quad (6)$$

$a^*$  = constante "a" recalculada

### 3.6 Determinación de las propiedades geotécnicas

Después de haber realizado la corrección de los valores a y b se procede a introducir los valores de HLD, LLD, A\* Y B\*, ya que el programa tiene ciertas limitantes que son:

- El programa no funciona para taludes superiores a  $45^\circ$  y menores de  $10^\circ$
- No se permite el valor de  $b > 1$

Se procede a introducir todo el universo de los taludes con sus respectivos valores de entrada y de esta manera el programa que se encuentra alimentado por una base de datos de más de 3000 laderas colombianas me suministrará los parámetros geotécnicos como de densidad, porosidad, resistencia entre otros, para cada talud, y la altura promedio de todos los taludes a corto, mediano y largo plazo, el cual será la altura en la cual la probabilidad de falla será igual a uno “1” siendo mi punto de referencia para evaluar cada uno de los taludes de nuestro universo.

En la figura 8 y 9 se visualizan algunos de los parámetros obtenidos del programa computacional del ingeniero González como lo son la presión de poros normalizada y el peso unitario total para cada valor de la tangente de BLD que no es más que la relación entre LLD y HLD correspondientes al universo de taludes respectivamente.

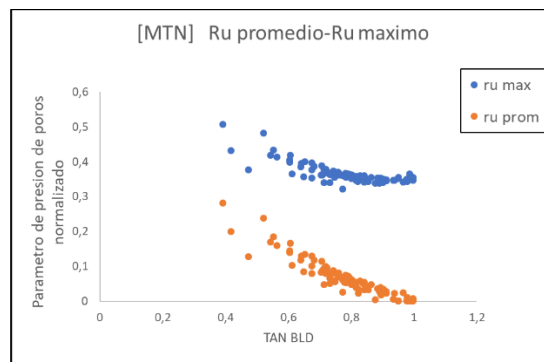


Figura 9. Grafica de presión de poros normalizados vs Tan BLD

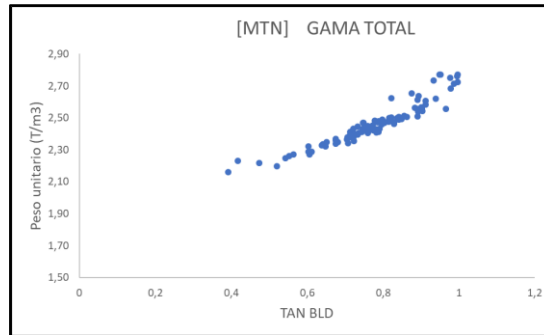


Figura 10. Grafica peso unitario total vs Tan BLD

#### 4. Evaluación de la estabilidad y deslizamiento

##### 4.1 Evaluación del factor de seguridad Incondicional

Una vez obtenidos los datos de altura máxima (HLD) y longitud máxima (LLD) de los taludes principales se procede a calcular una regresión potencial para el conjunto de datos (figura HLD vs LLD) como se observa en la figura 10 donde la ecuación para dicha regresión es la siguiente

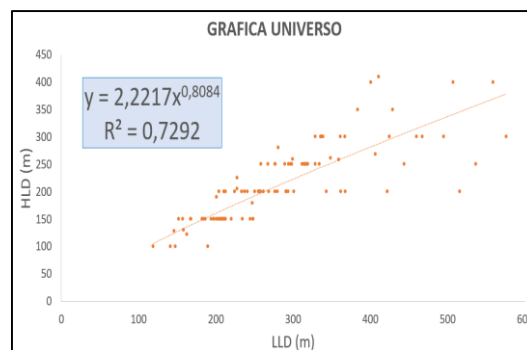


Figura 11. Datos del universo de taludes

Para el factor de seguridad relativo bajo condición incondicional se usa la siguiente relación de alturas expresada en la ecuación (7)

$$F. S. = \frac{H_{LD}}{H_{rt}} \quad (7)$$

$$H_{rt} = \text{altura crítica de falla}$$

En donde HLD es la altura máxima del talud en análisis y Hrt es la altura crítica que se determina con la ecuación (8), la cual es función de la altura definida por la regresión potencial del universo de datos  $H_{ro}$  y una constante  $H_{ot}$  que se relaciona con el periodo de tiempo analizado (largo, mediano y corto plazo) que en esta investigación se asumieron los periodos propuestos en el análisis por deslizamiento de la ciudad de Bogotá (Vargas R, 2016) los cuales son tiempos estándares que el método establece, los tiempos se ve en la tabla 2

Tabla 1.

*Periodo de tiempo tomados en el análisis de MTN Curos.Guaca*

| Periodo de tiempo | Años  |
|-------------------|-------|
| corto plazo       | 4,2   |
| mediano plazo     | 16,44 |
| largo plazo       | 23,41 |

$$H_{rt} = 10^{\frac{\log_{10} H_{ro}^2}{\log_{10}(H_{ro}+H_{ot})}} \quad (8)$$

$$H_{ro} = \text{Altura dela regresión del universo de datos.}$$

$$H_{ot} = \text{Constante MTN para cada periodo de tiempo.}$$

Shuk pudo deducir con base a los resultados de la envolvente del universo que estos corresponden a una condición a largo plazo y a partir de esto se infirió que la envolvente actual corresponde realmente a un estado de estabilidad a largo plazo, y que el análisis llevado a cabo

convencionalmente hace referencia a un análisis a corto plazo (Gonzalez, 2016). Es por esto que se establecen 3 periodos de tiempo para determinar los factores de seguridad y la probabilidad de falla, se introduce el término *Hot* dentro de la ecuación para determinar la altura crítica el cual se encuentra asociado para cada periodo de tiempo, siendo este igual a cero en largo plazo y mayor que cero para corto y mediano plazo, esto en base a los análisis llevados a cabo por Shuk.

Como deja en evidencia Gonzales (2016) la altura *Hot* hace referencia a la altura máxima vertical de materiales geológicos, tenemos entonces que para mediano plazo la altura *Hot* se obtiene a nivel de masa de suelo (*H<sub>om</sub>*) y para el corto plazo lo obtenemos a nivel de elemento (*H<sub>oe</sub>*). Dichas alturas son resultado del programa del Ing. Álvaro Gonzales teniendo como datos de entrada la altura máxima de la familia de taludes trabajada HLD, la longitud máxima de las mismas (LLD) y los coeficientes a y b de la función potencial obtenida del universo de datos, en este caso en particular los datos de entrada son HLD=410 y LLD=576,01 en la tabla 3 se aprecian los valores obtenidos de *Hot* para mediano y corto plazo

Tabla 2.

*Hot para corto y mediano plazo*

| Periodo       | Hot (m)    |
|---------------|------------|
| Largo         | 0          |
| Mediano Plazo | 6,6732365  |
| Corto Plazo   | 107,239453 |

Entonces para cada escenario se tiene:

Para largo plazo:

$$H_{rt} = 10^{\frac{\log_{10} H_{ro}^2}{\log_{10}(H_{ro})}} \quad (9)$$

Para mediano plazo:

$$H_{rt} = 10^{\frac{\log_{10} H_{r0}^2}{\log_{10}(H_{r0} + 6.6732365)}} \quad (10)$$

Para corto plazo:

$$H_{rt} = 10^{\frac{\log_{10} H_{r0}^2}{\log_{10}(H_{r0} + 107.239453)}} \quad (11)$$

Para calcular la probabilidad de falla se sigue el procedimiento de Gonzales (2016) donde se establece que la probabilidad de falla para largo, mediano y corto plazo se calcula con la expresión (12)

$$\ln(p_f) = (F_{ST}^K) \ln(0.5) \quad (12)$$

Para obtener el parámetro de distribución de Weibull definido como K es necesario determinar la relación entre la media del factor de seguridad  $\overline{F_{ST}}$  y la desviación estándar  $\sigma$  para cada periodo de tiempo como se indica en la siguiente expresión (13)

$$Cv_{FST} = \frac{\sigma}{\overline{F_{ST}}} \quad (13)$$

$Cv_{FST}$  = Coeficiente de variación del factor deseguridad

Con base en González (2016), el parámetro K, se puede aproximar como una función del coeficiente de variación del factor de seguridad (Gonzalez, 2016) ,  $Cv_{FST}$ , con la siguiente expresión (14)

$$K \approx 1.7285 + 1.248Cv_{FST}^{-1} + 1.058Cv_{FST}^{-0.5} - 3.040Cv_{FST}^{-0.25} \quad (14)$$

Con base en los cálculos anteriores el factor de seguridad relativo con su probabilidad de falla asociada quedan definidos para escenarios de largo, mediano y corto plazo mostrado con más detalle en el anexo 4 (FS\_PF), con estos datos se procede a realizar una interpolación para distribuir los factores de seguridad en el área completa de estudio, con los intervalos obtenidos se crea una

distribución de los niveles de amenaza acorde a los resultados y con base en el estudio de Ingeocim (Shuk, 1999) ,los cuales se usaran para las diferentes evaluaciones de falla que se tienen en cuenta en el presente estudio, para este escenario se seccionaron como se muestra en la tabla 4.

Tabla 3.

*Rangos de los niveles de amenaza por MTN*

| Nivel de Amenaza<br>por MTN | Valores de Fs<br>asociados |
|-----------------------------|----------------------------|
| Amenaza muy alta            | $FS \leq 0.5$              |
| Amenaza alta                | $0.5 < FS \leq 0.75$       |
| Amenaza media               | $0.75 < FS \leq 1.05$      |
| Amenaza baja                | $1.05 < FS \leq 1.5$       |
| Amenaza muy baja            | $FS > 1.5$                 |

En la figura 11 se plasma el producto de la MTN en la zonificación de la vía trazada en el escenario incondicional a largo plazo, los mapas de zonificación a corto y mediano plazo se ven en el anexo 8.

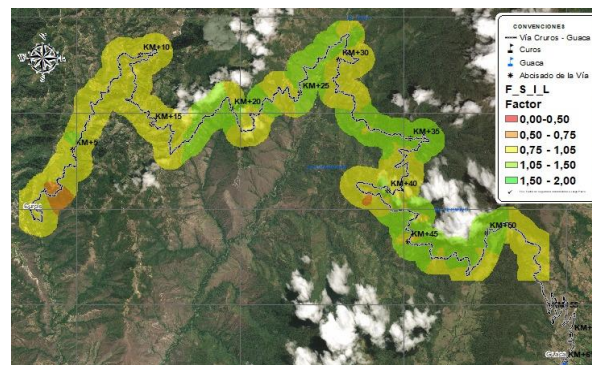


Figura 12. Mapa de zonificación en condición incondicional a largo plazo

#### 4.2. Evaluación del factor de seguridad por sismo

A continuación, se muestra el flujo y efecto de la metodología usada para calcular la probabilidad de falla y el factor de seguridad asociado al sismo en los determinados periodos de tiempo, los valores de aceleración horizontal en superficie se determinan con base al tiempo de retorno del sismo de diseño expresado en la norma sismo resistente NSR 10 el cual es de 475 años, en las Figuras 12 y 13 se muestra entonces el diagrama de flujo general y el efecto que el sismo tiene sobre la geometría del talud respectivamente.

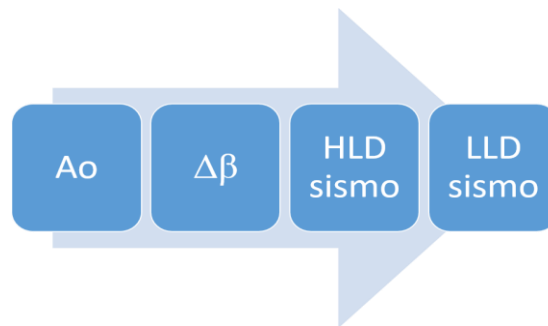


Figura 13. Diagrama de flujo factor de sismo

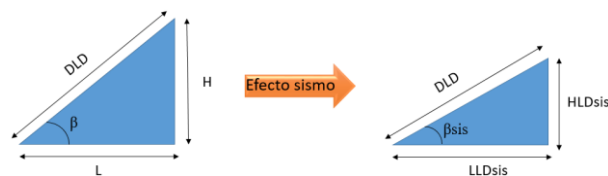


Figura 14. Efecto de transformación del talud por sismo

En este caso la aceleración se traduce en una variación en el ángulo de inclinación de cada talud por lo que en base a esto se calcula una nueva altura del talud HLDsis y dependiendo de esta variable se obtiene una longitud nueva para el talud LLDsis conservando la hipotenusa original

DLD. Con la nueva altura obtenida se calculan los factores de seguridad para los periodos de tiempo (largo, mediano y corto plazo) se conservan las alturas Hom y Hoe descritas anteriormente junto con la ecuación de envolvente del universo.

Posteriormente se calcula la variación del ángulo de inclinación de cada uno de los taludes máximos, con la expresión 15:

$$\Delta\beta LD = \tan^{-1} \left[ \frac{a_0}{g} \right] \quad (15)$$

Donde:

$\Delta\beta LD =$  *ángulo entre la aceleración pico efectiva y la gravedad*

$a_0 =$  *aceleración pico efectiva, tomada de la NSR10, donde para la vía es 0,25*

$g =$  *gravedad*

Adicionalmente se calcula un factor de incremento del peso unitario por medio de la expresión (16)

$$FG = \left[ 1 + \left( \frac{a_0}{g} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

$FG =$  *Factor de incremento del peso unitario*

Se recalcula la tangente del ángulo de inclinación equivalente con la siguiente expresión (17):

$$\beta LD = \tan^{-1} \left( \frac{HLD}{LLD} \right) \quad (17)$$

$\beta LD =$  *ángulo entre la altura limite y la longitud limite del universo*

$$\tan \beta LD_{eq} = \frac{\tan \beta LD^2}{\tan(\beta LD + \Delta\beta LD)} \quad (18)$$

Calculado el ángulo de inclinación equivalente, lo siguiente es estimar la altura del talud equivalente usando la ecuación (19):

$$HLD_{SIS} = HLD_{eq} = DLD * \quad (19)$$

$$\frac{\sin(\beta LD_{eq})}{FG}$$

$$HLD_{SIS} = \text{Altura limite para sismo}$$

Donde DLD es la hipotenusa del triángulo formado por la altura y longitud del talud. Su magnitud se conserva de la condición original, como se expresa en la siguiente ecuación (20):

$$DLD = (HLD^2 + LLD^2)^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

$$\beta LD = \text{Hipotenusa entre la altura y la longitud limite}$$

Posteriormente se calcula la longitud equivalente a partir de la hipotenusa y de la altura equivalente sísmica, como se indica en la expresión (20)

$$LLD_{sis} = LLD_{eq} = (DLD^2 - \quad (21)$$

$$HLD_{SIS}^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$LLD_{SIS} = \text{Longitud limite para sismo}$$

Con la longitud y altura equivalentes  $LLD_{sis}$  y  $HLD_{sis}$  son calculados los factores de seguridad relativos por sismo usando la relación entre la altura equivalente por sismo y la altura de la envolvente del universo antes mencionada (22).

$$F_{st} = \frac{HLD_{sis}}{H_{RT}} \quad (22)$$

$$F_{st} = \text{Factor de seguridad para sismo}$$

El cálculo se realiza para cada talud y se interpolan sus valores para determinar la distribución en las zonas analizadas y para cada periodo de tiempo, proceso que se muestra en el anexo 4 (FS\_PF)

Para la probabilidad de falla por sismo se usa el mismo principio que en el caso incondicional, donde es necesario calcular la media del factor de seguridad, la desviación estándar, el coeficiente

de variación  $C_vf$ , el parámetro  $K$  de la distribución de Weibull y la probabilidad de falla, lo anteriormente descrito se usa en los 3 escenarios.

En el caso de sismo se calcula la probabilidad de ocurrencia con un periodo de retorno de 475 años y el periodo de tiempo asociado a cada escenario mediante la siguiente expresión

$$POC_{sismo} = 1 - \exp\left(\frac{-Tiempo}{TR_{SISMO}}\right) \quad (23)$$

$$POC_{sismo} = \text{Probabilidad de ocurrencia de la falla por sismo}$$

En la tabla 5 se muestran las probabilidades de ocurrencia por sismo para los periodos de tiempo asociados.

Tabla 4.

*Probabilidad de ocurrencia para sismo*

| <b>Periodo</b> | <b>POC_sismo</b> |
|----------------|------------------|
| Corto plazo    | 0,0088031        |
| Mediano plazo  | 0,0340225        |
| Largo plazo    | 0,04810885       |

En la figura 14 se plasma el producto de la MTN en la zonificación de la vía trazada en el escenario sismo a largo plazo, los mapas de zonificación a corto y mediano plazo se muestran en el anexo 9.

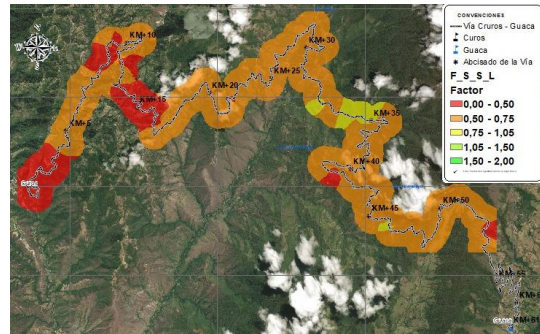


Figura 15. Mapa de zonificación en condición de sismo a largo plazo

### 4.3 Evaluación del factor de seguridad por lluvia

**4.3.1.1 Asignación de valores de CN.** La determinación de escurrimiento de aguas superficiales reviste una gran importancia desde el punto de vista de la ingeniería, sino que también depende del ámbito social y económico. Para poder diseñar estructuras que permitan aprovechar y controlar el agua, por lo cual es necesario conocer la magnitud y extensión de los escurrimientos (Moya P., 2018)

Existen varios métodos internacionales para el cálculo del escurrimiento, basados en correlaciones y otros más sofisticado que tienen en cuenta varios parámetros naturales. Donde el método propuesto por el Servicio de Conservación de suelos de los Estados Unidos (USSCS) es el más aceptado por su simplicidad y mediano requerimiento de información.

La metodología del número de curva es la más empleada para transformar la precipitación total en precipitación efectiva, ella requiere el conocimiento del tipo y uso del suelo de la zona de estudio.

Las tablas de cálculo para determinar este factor se encuentran en el anexo 5(DETERMINACIÓN DEL CN).

**4.3.1.2 Tipo del suelo.** Para nuestro caso de estudio se usó el mapa geológico mostrado en la ilustración 11 para clasificar el suelo dependiendo del tipo, se tuvo en cuenta el parámetro de la permeabilidad, donde se buscó información acerca de la estructura geológica de cada formación, que indicara tan fracturada estaba la roca, siendo este un parámetro importante para determinar la permeabilidad del suelo.

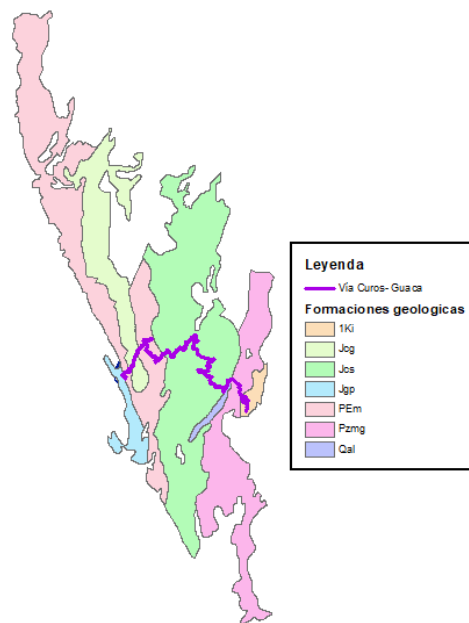


Figura 16. Formaciones geológicas involucradas en el trazado

Se encontraron un total de siete formaciones geológicas, en las cuales se intersectan con la vía. Las cuales se definen en el anexo 5 (DESCR\_GEO\_TIPO\_SUELO)

En dicha tabla se puede observar que las formaciones presentes tienen un gran grado de meteorización haciendo que tengan un alto grado de permeabilidad.

Realizando un análisis general de los suelos del departamento y observando el mapa geológico, de la zona, se encuentra que la vía está afectada por 3 grandes fallas (Bucaramanga-Santa marta, Umpala y de Perchiquez), acompañadas de otras de menor magnitud.

Se logra determinar el gran grado de meteorización en el que se encuentran los suelos, por lo cual a diferencia del estudio de Bogotá en el cual se manejaron 4 tipos de clasificaciones, para nuestro estudio se determinaron solo 2 grupos (A y B), clasificados de manera siguiente en la tabla 6.

Tabla 5

*Clasificación de las formaciones geológicas presentes en el área de estudio*

| Clasificación | Formaciones geológicas presentes |
|---------------|----------------------------------|
| A             | Qal, Pzmg, 1K1                   |
| B             | Pem, Pzmg, Jcs Jcg               |

**4.3.1.3 Uso del suelo.** Para determinar los diferentes usos del suelo que se manejan en nuestra zona de estudio y su delimitación se manejó como información base el mapa de la capacidad del uso del suelo mostrado en la Figura 16 el cual se encuentra disponible en el geoportal del IGAC en formato shepfile.

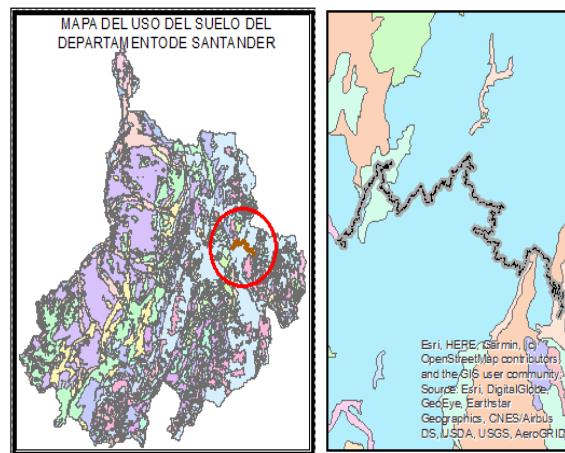
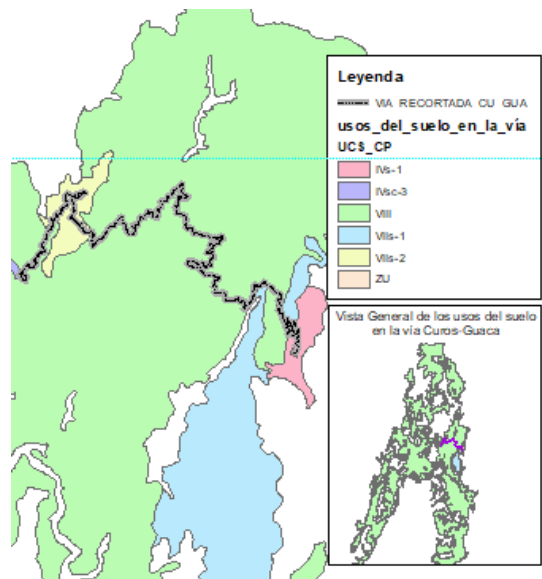


Figura 17. Mapa de uso de suelo

En la figura 17 se muestran los polígonos de interés, los cuales se interceptan con la vía.



*Figura 18.* Uso de suelo involucrados en el trazado

En el anexo 5 (USO\_PROYECTO) se describen los usos del suelo presentes en la vía.

Dependiendo de su descripción se asimilo a la codificación que se realizó en Bogotá por parte de INGEOCIM, además que por medio de la georreferenciación por medio de arcgis se encontraron taludes en 3 clasificaciones de las anteriores mencionadas (Vargas R, 2016).

A continuación, se presenta la tabla 7 con la nomenclatura de INGEOCIM para la zona de estudio.

Tabla 6.

*Nomenclatura INGEOCIM*

| UCS<br>proyecto | Nomenclatura<br>INGEOCIM |
|-----------------|--------------------------|
| VIII            | S3/R2                    |
| VIIIs-2         | P1a                      |
| VIIIs-1         | A1a                      |

**4.3.1.4 Asignación del CN.** A cada talud por medio del tipo y del uso del suelo, se le asigna un valor del CN, calculado por INGEOCIM, descritos en la Tabla 8. Donde los resultados se encuentran en el anexo 5 (CN\_PROYECTO\_TALUD)

Tabla 7.

*Valores de CN asociados al uso de suelo*

| Uso   | Valores de CN-I |       |
|-------|-----------------|-------|
|       | Tipo Suelo      |       |
|       | A               | B     |
| A1a   | 38,96           | 55,28 |
| S3/R2 | 47,7            | 62,84 |
| P1a   | 29,65           | 49,48 |

**5.3.2 Tiempo de retorno y Precipitación Crítica.** Para la metodología de cálculo se siguió como guía lo indicada González (González A., s.f.).

**4.3.2.1 Inventario de deslizamientos.** Inicialmente se realizó el inventario de deslizamientos que se han presentado en la vía años anteriores, por lo cual debido a que es un trayecto con

constantes problemas geotécnicos, y de los proyectos de infraestructura que se están realizando para su mejoramiento, la prensa como vanguardia, el espectador, la tienen muy bien documentada con respecto a la fecha de la falla y su localización.

En un inicio se encontraron 28 eventos que se presentaron en el trayecto Curos-Malagá de los cuales se filtraron los que se ubicaban en la zona de estudio, y de los que se tenían información completa en cuanto a su ubicación, de los cuales quedaron 17 eventos, donde debido a que el IDEAM tienen 2 estaciones pluviométricas se realizó el análisis hidrológico por medio de su fecha de los cuales quedaron un total de 14, ya que no se tenía información del año 2017, 2018 y 2019 completa.

En el anexo 6 (DESLIZAMIENTOS) se encuentran los registros de los deslizamientos encontrados por medio de prensa o reportes oficiales con su respectivo link.

**4.3.2.2 Curvas de masa.** Con los registros históricos se construyó una curva de masa de lluvias en formas retrospectiva de 90 días, mostrada en la ilustración 14 debido a que se ha demostrado que los detonantes de los eventos de masa se producen por lluvias a cumuladas a largo plazo (González-García & Mayorga-Márquez, 1997). Donde a cada evento se le relaciono con una estación en particular, debido a su cercanía, donde se recopiló la precipitación diaria por medio del IDEAM (Vargas R, 2016)

Después de ello, se identificaron varios picos “umbrales” con sus respectivas duraciones, donde debido al tiempo, se analizaron los picos más representativos, alrededor de 3 o 4 por evento. Estos puntos se ubican en los cambios de pendiente de la curva de masa ya que representan el comienzo de un periodo seco (González A., s.f.)

Para estas duraciones se calcularon las precipitaciones acumuladas correspondientes en cada duración como se ilustra en la figura 18 (González-García & Mayorga-Márquez, 1997).



Figura 19. Curva de masa acumulada en Tope El

Las curvas de masa de todos los eventos (14) se encuentran en el anexo 6 (CURVAS DE MASA)

**4.3.2.3 Determinación del tiempo de retorno y precipitación crítica.** Para cada una de las duraciones se calcularon los tiempos de retorno, tomando los valores máximos para cada año y así obtener la serie histórica máxima de las duraciones para cada evento. Estas series se ajustan a la distribución de valores extremos de Gumbell.

Estas series para cada evento estudiado se encuentran en el anexo 7, para cada evento se tomó la duración de mayor periodo de retorno, ya que es el evento menos frecuente.

Tabla 8.

*Factores críticos asociados a los deslizamientos*

| <b>Deslizamiento</b> | <b>Pcritica</b> | <b>Duracion</b> | <b>TR Critico</b> |
|----------------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| 6/12/2010            | 452,1           | 69              | 2,63              |
| 23/12/2010           | 451,2           | 73              | 2,87              |
| 17/10/2013           | 165,4           | 25              | 9,45              |
| 5/09/2013            | 290,7           | 74              | 2,41              |
| 7/11/2014            | 382,1           | 72              | 1,82              |
| 21/04/2010           | 164,4           | 82              | 1,50              |
| 16/11/2012           | 353,4           | 66              | 1,83              |
| 27/04/2016           | 155             | 48              | 3,39              |
| 27/04/2011           | 332,8           | 74              | 9,72              |
| 21/04/2015           | 177,6           | 60              | 4,34              |
| 15/04/2015           | 82,3            | 27              | 3,43              |
| 26/08/2010           | 348,1           | 60              | 6,21              |
| 9/04/2009            | 220,3           | 71              | 4,92              |
| 17/06/2008           | 61,4            | 26              | 1,37              |

Por medio del análisis anterior, se logra identificar que el tiempo de retorno más crítico sería el de 9,72 años, debido a que es el evento menos frecuente (González A., s.f.) el cual tiene una precipitación crítica de 332,8 mm, por lo cual serán los datos de entrada para el cálculo los factores de seguridad y probabilidad de falla teniendo en cuenta la variable de lluvia en este caso.

**4.3.2.4 Determinación de parámetros de lluvia.** Después del cálculo del CN, periodo de retorno y lluvia crítica se procede a calcular la escorrentía(R), la infiltración(I) y la reserva de agua útil en el suelo para las plantas con lluvia (Rull) para cada talud (Soulis & Valiantzas, 2012).

- **Escorrentía**

En primera instancia se calcula la máxima retención potencial con la siguiente expresión (24).

$$S'(mm) = \left(\frac{25400}{CN}\right) - 254 \quad (24)$$

$$S'(mm) = \text{Maxima retención potencial}$$

Dependiendo de la precipitación crítica y la máxima retención potencial, se procede a calcular la escorrentía.

$$\text{Para } P \leq 0.20 * S' \quad (25)$$

$$R(mm) = 0$$

$$\text{Para } P > 0.20 * S' \quad (26)$$

$$R(mm) = \frac{(P - 0.20 * S')^2}{(P + 0.80 * S')} \quad (26)$$

$$R(mm)$$

$$= \frac{(P - 0.20 * S')^2}{(P + 0.80 * S')}$$

$$R(mm) = \text{Escorrentía}$$

- **Infiltración (I)**

La infiltración se determinará por medio de la expresión (27) como la diferencia entre la precipitación y la escorrentía.

$$I(mm) = P(mm) - R(mm) \quad (27)$$

- **Reserva útil de agua en el suelo con lluvia (Rull)**

Se debe calcular la variación del Tu por lluvia con la expresión (28) y por ultimo calcular la reserva útil de agua en el suelo con lluvia por medio de la expresión (29).

$$\Delta R_u = \frac{[I * (\frac{A_a}{A})]}{[n_{ef} * \gamma * HLD]} \quad (28)$$

$$R_{ull} = R_{upr} + \Delta R_u \leq \quad (29)$$

$$R_{umax} \leq 1.0$$

Donde:

$\Delta R_u$  = Incremento de  $T_u$  por lluvia

$I$  = Infiltración (mm)

$\frac{Aa}{A}$  = 3.0 relación de área aferente

al talud y área del talud

$n_{ef}$  = Porosidad efectiva,  $\frac{2}{3} * n$

$n$  = porosidad total

(función del  $G_s$  y de  $\gamma_d$ )

$\gamma$  = peso unitario total

de la masa de suelo

$R_{ull}$  =  $R_u$  con lluvia

$R_{upr}$  =  $R_u$  promedio MTN

(salida del programa AJGG)

$R_{umx}$  =  $R_u$  máximo de MTN

(salida del programa AJGG)

Estos parámetros se encuentran consignados en el Anexo 3 (HLLUV\_LLLUV)

**4.3.3 Calculo del factor de seguridad y probabilidad de falla por lluvia.** Obtenidos los valores del parámetro adimensional de presión de poros  $R_{ull}$ , y los resultados de las propiedades de densidad como el peso unitario total  $\gamma$ , el peso unitario seco  $\gamma_d$ , se calculan la altura y la longitud del talud equivalentes teniendo en cuenta la lluvia, HLDII y LLDII. (Vargas R, 2016)

El término "DLD" se calculará con la expresión (19).

$$HLDll = HLD * \left( \frac{\gamma}{\gamma_{sat}} \right) * \left[ \frac{(1 - R_{ull})}{1 - R_{uprm}} \right]^{\frac{1}{b}}$$

$$LLDll = (DLD^2 - HLDll^2)^{0.5} \quad (30)$$

$HLDll = \text{Altura limite para lluvia}$

$LLDll = \text{Longitud limite para lluvia}$

El factor de seguridad de lluvia se calcula como una relación de la altura equivalente por lluvia (HLDLL) y la altura crítica determinada para la función del universo de datos utilizada en el cálculo incondicional en cada periodo de tiempo, como se observa en el anexo 3 (FS\_PF) (corto-mediano y largo plazo), como se determina en la expresión (30)

$$F.S._{ll} = \frac{HLDLL}{H_{rt}} \quad (31)$$

La probabilidad de ocurrencia se calcula mediante la siguiente ecuación para cada periodo de tiempo, teniendo en cuenta un periodo de retorno de 9,71 años.

$$POC_{lluvia} = 1 - \exp\left(\frac{-Tiempo}{TR_{lluvia}}\right) \quad (32)$$

Donde la probabilidad ocurrencia para cada periodo de estudio se muestra en la tabla 10.

Tabla 9.

*Probabilidad de ocurrencia para evento lluvia*

| <b>Periodo</b>   | <b>POC_lluvia</b> |
|------------------|-------------------|
| Corto plazo      | 0.351143          |
| Mediano<br>plazo | 0.816089          |
| Largo plazo      | 0.910356          |

En la figura 19 se plasma el producto de la MTN en la zonificación de la vía trazada en el escenario de lluvia a largo plazo, los mapas de zonificación a corto y mediano plazo se muestran en el anexo 10.

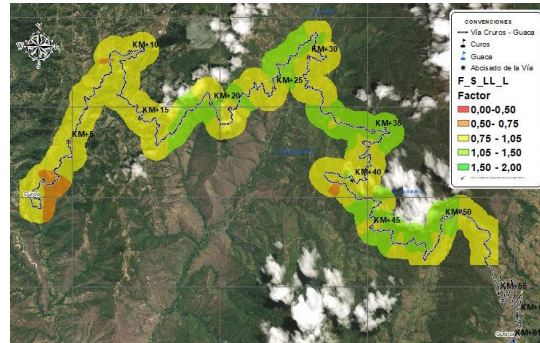


Figura 20. Mapa de zonificación en condición de lluvia a largo plazo

#### 4.4 Evaluación del factor de seguridad por sismo y lluvia.

En este análisis se tomará como base el conjunto de valores de altura(HLDsis) y longitud(LLDsis) equivalentes por sismo, los cuales ya fueron calculados con anterioridad para cada talud, donde se les adicionara el efecto del agua en estos, por lo que se usaran las correlaciones establecidas por González.

Se calculará la altura teniendo el factor sismo y lluvia.

$$HLDll_{sis} = HLDsis * \left(\frac{\gamma}{\gamma_{sat}}\right) * \left[\frac{(1-R_{ull})}{1-R_{uprm}}\right]^{\frac{1}{b}} \quad (33)$$

$$HLDll_{sis} = \text{Altura limite de lluvia y sismo}$$

En la ilustración 15 se ven los efectos del escenario sismo en el talud original, presentando variación en el ángulo y catetos, pero conservando constante la hipotenusa

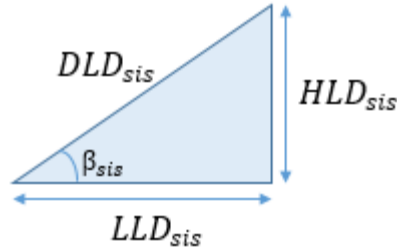


Figura 21. Geometría de transformación del talud por efecto sísmico

En este caso la hipotenusa DLD se calcula tomando como catetos HLD<sub>sis</sub> y LLD<sub>sis</sub>.

$$DLD_{sis} = (HLD_{sis}^2 + LLD_{sis}^2)^{0.5} \quad (34)$$

$DLD_{sis}$  = Hipotenusa geométrica del talud de  
lluvia y sísmo

$$LLD_{ll\_sis} = (DLD_{sis}^2 - HLD_{ll\_sis}^2)^{0.5} \quad (35)$$

$LLD_{ll\_sis}$  = Longitud límite de lluvia y sísmo

Una vez se ha establecido la altura y longitud de taludes equivalente por lluvia y sísmo, se calcula el factor de seguridad de la misma forma que en los casos anteriores, plasmándose en el anexo 3 (FS\_PF), preservando los valores H<sub>m</sub> y H<sub>e</sub>.

$$F.S._{ll\_sis} = \frac{HLD_{ll\_sis}}{H_{rt}} \quad (36)$$

$F.S._{ll\_sis}$  = Factor de seguridad de lluvia y  
sísmo

La lluvia y el sísmo combinados reducen drásticamente los factores de seguridad y aumentan las probabilidades de deslizamiento en términos de estos factores ( $POC_{ll\_sis}$ ). Sin embargo, debido a que la probabilidad que se presenten ambos escenarios simultáneos es bajo, la probabilidad combinada de falla es menor que la probabilidad de los eventos extremos, por lo cual la

probabilidad de ocurrencia se define como el producto de la probabilidad de falla de sismo y lluvia en el escenario de largo plazo y esta misma se asume en los escenarios de corto y mediano plazo.

$$POC_{ll\_sis} = POC_{ll} * POC_{sis} \quad (37)$$

$$POC_{ll\_sis} = \text{Probabilidad de ocurrencia de lluvia y sismo}$$

Los resultados se representan en la tabla 11.

Tabla 10.

*Probabilidad de ocurrencia para evento lluvia más sismo*

| Periodo     | POC_lluvia_sismo |
|-------------|------------------|
| Largo plazo | 0,043796195      |

El periodo de retorno correspondiente al caso combinado lluvia más sismo se calcula con la probabilidad de ocurrencia a largo plazo y será el mismo para los escenarios de corto y mediano plazo, se recalculan las probabilidades de ocurrencia a partir del tiempo de retorno a largo plazo para los escenarios distintos a este (corto y mediano plazo).

$$TR_{ll\_sis} = \frac{-Tiempo}{Ln(1-POC_{ll\_sis})} \quad (38)$$

$$TR_{ll\_sis} = \text{Tiempo de retorno de lluvia y sismo}$$

Los resultados obtenidos de tiempo de retorno y probabilidad de ocurrencia se expresan en la tabla 12 y 13 respectivamente.

Tabla 11.

*Tiempo de retorno asociados al escenario de largo plazo*

| Periodo     | TR_lluvia_sismo |
|-------------|-----------------|
| Largo plazo | 522,9450543     |

Tabla 12.

*Probabilidades de ocurrencia para los diferentes escenarios de tiempo*

| Periodo       | POC_lluvia_sismo |
|---------------|------------------|
| Largo plazo   | 0,043796195      |
| Mediano plazo | 0,030952028      |
| Corto plazo   | 0,007999271      |

En la figura 21 se plasma el producto de la MTN en la zonificación de la vía trazada en el escenario lluvia más sismo a largo plazo, los mapas de zonificación a corto y mediano plazo se muestran en el anexo 11.

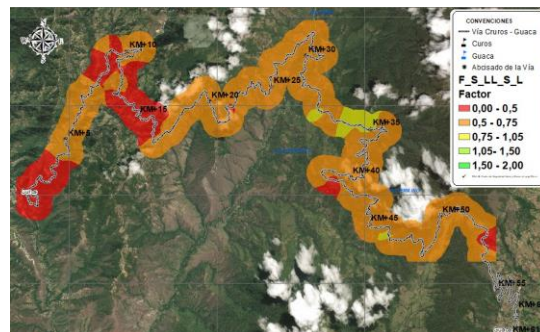


Figura 22. Mapa de zonificación en condición lluvia más sismo a largo plazo

#### 4.5 Evaluación del factor de seguridad total

De acuerdo con González (2016), los factores de seguridad totales constituyen un problema inverso, por ello se debe abordar de una manera distinta a las demás, las probabilidades de falla total se pueden estimar mediante el teorema de la probabilidad total y a partir de ahí se pueden determinar los factores de seguridad totales iterativamente hasta ajustar a un mínimo de error, el valor del parámetro  $K$  de Weibull.

La probabilidad de falla total para cada talud, se calcula a partir de las probabilidades de falla de cada escenario (incondicional, sismo, lluvia, lluvia-sismo) por medio de la expresión (38)

$$\begin{aligned}
 Pf_{total} &= Pf_{inc} * (1 - POC_{ll}) + Pf_{sis} * (1 - POC_{ll}) * (POC_{sis}) + Pf_{ll} * (POC_{ll}) * (1 - POC_{sis}) + \\
 &Pf_{ll\_sis} * (POC_{ll\_sis})
 \end{aligned}
 \tag{39}$$

*Pf<sub>total</sub> = Probabilidad de falla total*

Seguidamente, se ponderan utilizando la ecuación anterior los factores de seguridad promedio y la desviación estándar para cada periodo de tiempo con las expresiones (39) y (40)

$$\begin{aligned}
 \overline{FS} &= \overline{FS}_{inc} * (1 - POC_{ll}) + \overline{FS}_{sis} * (1 - POC_{ll}) * (POC_{sis}) + \overline{FS}_{ll} * (POC_{ll}) * (1 - POC_{sis}) + \\
 &\overline{FS}_{ll\_sis} * (POC_{ll\_sis})
 \end{aligned}
 \tag{40}$$

$$\overline{FS} = \text{Factor de seguridad total} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} = & \sigma_{inc} * (1 - POC_{sis}) * (1 - \\ & POC_{ll}) + \sigma_{sis} * (1 - POC_{ll}) * \\ & (POC_{sis}) + \sigma_{ll} * (POC_{ll}) * (1 - \\ & POC_{sis}) + \sigma_{ll_{sis}} * (POC_{ll_{sis}}) \end{aligned}$$

$$\bar{\sigma} = \text{Desviación estandar total}$$

Con el promedio del factor de seguridad calculado a partir de los valores promedio del factor de seguridad de los diferentes escenarios (incondicional, sismo, lluvia y lluvia-sismo) y con la desviación estándar promedio se calcula el coeficiente de variación promedio mediante la siguiente expresión:

$$\overline{C_v} = \frac{\overline{FS}}{\bar{\sigma}} \quad (42)$$

$$\overline{C_v} = \text{Coeficiente de variación total}$$

Seguidamente se calcula el parámetro  $K$  de Weibull mediante la aproximación sugerida por el Ing. Álvaro González:

$$\begin{aligned} \bar{K} \approx & 1.7285 + 1.248C_v^{-1} + \\ & 1.058C_v^{-0.5} - 3.040C_v^{-0.25} \end{aligned} \quad (43)$$

$$\bar{K} = \text{Coeficiente } K \text{ aproximada(Calculada)}$$

Se realiza una ponderación del coeficiente  $K$  de Weibull a partir de los valores de  $K$  obtenidos para cada escenario aplicando el teorema de probabilidad total, por medio de la expresión (43)

$$K_2 = K_{inc} * (1 - POC_{sis}) * \quad (44)$$

$$(1 - POC_{ll}) + K_{sis} * (1 -$$

$$POC_{ll}) * (POC_{sis}) + K_{ll} *$$

$$(POC_{ll}) * (1 - POC_{sis}) +$$

$$K_{ll_{sis}} * (POC_{ll_{sis}})$$

$K_2 =$  *Coeficiente K del teorema*

A partir de los dos valores de K obtenidos se establece un promedio del mismo, según la expresión (44)

$$K_1 = \frac{\bar{K} + K_2}{2} \quad (45)$$

$K_1 =$  *Coeficiente K promedio total*

El factor de seguridad total para cada familia de taludes se calcula a partir de la ecuación de probabilidad de falla como:

$$FS_{total} \quad (46)$$

$$= \exp \left( \frac{1}{K_1} \ln \left[ \frac{\ln \left( \frac{Pf_{total}}{100} \right)}{\ln(0.5)} \right] \right)$$

Con lo anterior, queda definido el factor de seguridad total descrito en el anexo 3 (FS\_PF), desde el punto de vista probabilístico, de acuerdo con la metodología MTN. En las figuras 22,23 y 24 se presentan los factores de seguridad totales para los tres periodos de tiempo analizados (corto, mediano y largo) respectivamente.

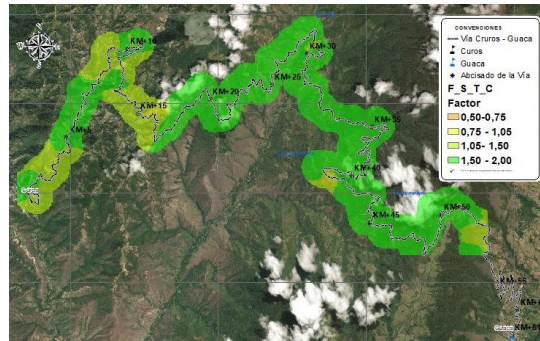


Figura 23. Mapa de zonificación en condición de falla total a corto plazo

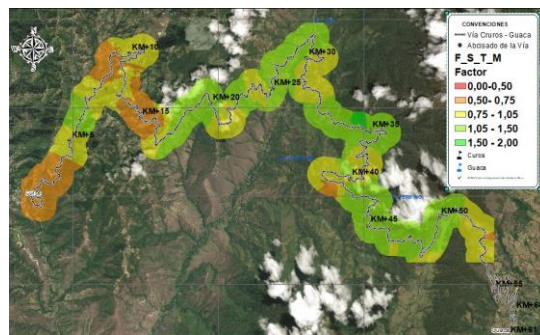


Figura 24. Mapa de zonificación en condición de falla total a mediano plazo

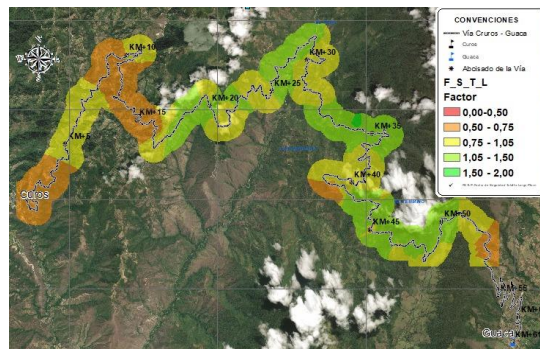


Figura 25. Mapa de zonificación en condición de falla total a largo plazo

En el anexo 12 se muestran los mapas de zonificación totales con un mayor detalle

## 5. Correlación de Datos

En las siguientes figuras se contrasta lo presenciado en la visita a campo en 4 diferentes puntos críticos de acuerdo al mapa de zonificación de falla total a largo plazo con los resultados obtenidos de la MTN, los kilómetros están medidos ubicando el origen (Km 00) al inicio de la Y entre Curos y el municipio de Guaca y en las tablas se muestra las probabilidades de falla y factores de seguridad de los taludes asociados al kilómetro analizado.

### 5.1 Kilómetro 12

En las fotografías de la Figura 25, se puede observar un deslizamiento con componente, principalmente traslacional. La morfología de la masa de suelo deslizada permite reconocer claramente el escarpe de la corona del deslizamiento con altura aproximada de 2m.



Figura 26. Registro fotográfico de campo en el Km 12

En la figura 25 se observa un talud de gran tamaño que tuvo una falla traslacional por motivos antrópicos y naturales, donde actualmente presenta cobertura vegetal leve.

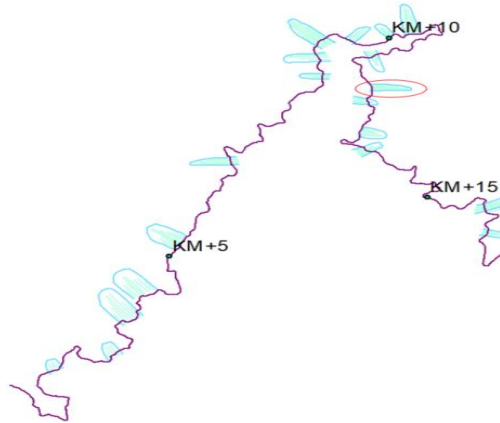


Figura 27. Localización del talud asociado al evento presentado en cercanías del kilómetro 12

En la tabla 14 se enuncian las propiedades geométricas del talud asociado al derrumbe mencionado como también su factor de seguridad y su probabilidad de falla.

Tabla 13.

*Propiedades del talud asociado al evento del Km12*

| <b>Km</b>    | <b>HLD</b> | <b>LLD</b> | <b>FS</b> | <b>PF</b>  |
|--------------|------------|------------|-----------|------------|
| <b>talud</b> |            |            |           | <b>(%)</b> |
| 12,4         | 200        | 361,85     | 0,76      | 90,38      |

## 5.2 Kilómetro 22

En las fotografías de la figura 27 se observan afectaciones en los taludes, por flujos de bloques de roca y suelo. En algunos sectores intervenidos con anclajes.



Figura 28. Registro fotográfico de campo en el Km 22

En la figura 27 se observan taludes de tamaño moderado que tuvieron una falla traslacional por motivos antrópicos y naturales, donde actualmente presenta cobertura vegetal mínima, además que en un punto se observa estabilización del talud por medio de anclajes. La Longitud de las coronas varían de 2 a 30 metros en los taludes.

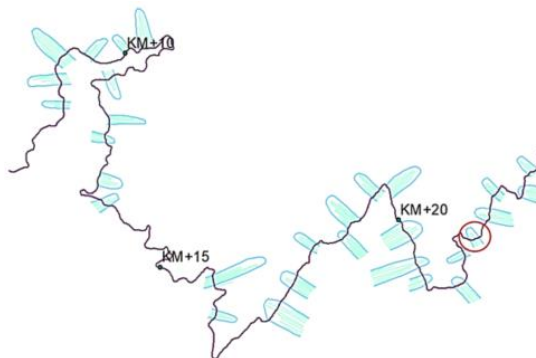


Figura 29. Localización del talud asociado al evento presentado en cercanías del kilómetro 22

En la tabla 15 se enuncian las propiedades geométricas del talud asociado al derrumbe mencionado como también su factor de seguridad y su probabilidad de falla.

Tabla 14.

*Propiedades del talud asociado al evento del Km22*

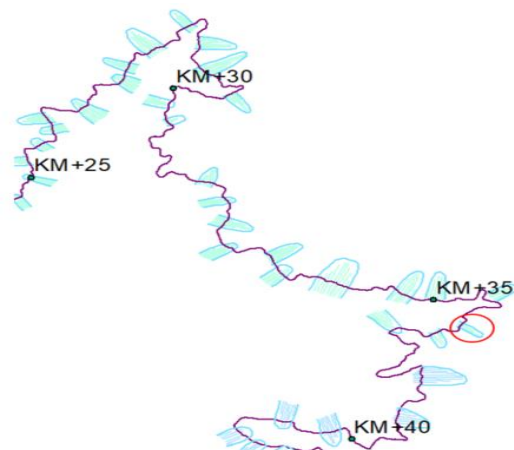
| <b>Km talud</b> | <b>HLD</b> | <b>LLD</b> | <b>FS</b> | <b>PF (%)</b> |
|-----------------|------------|------------|-----------|---------------|
| 22,2            | 100        | 148,06     | 0,79      | 88,22         |

### 5.3 Kilómetro 36

En la figura 29 se plasma talud en roca en condición estable.



*Figura 30.* Registro fotográfico de campo en el Km 36



*Figura 31.* Localización del talud asociado al evento presentado en cercanías del kilómetro 36

En la tabla 16 se enuncian las propiedades geométricas del talud asociado al derrumbe mencionado como también su factor de seguridad y su probabilidad de falla.

Tabla 15.

Propiedades del talud asociado al evento del Km36

| Km talud | HLD | LLD | FS   | PF (%) |
|----------|-----|-----|------|--------|
| 36,4     | 225 | 228 | 1,25 | 2,45   |

### 5.4 Kilómetro 42

En la figura 31 se observa deslizamientos de suelo residual en la banca de la vía y caídos de bloques y flujos de material en los taludes de corte.



Figura 32. Registro fotográfico de campo en el Km 42

En la figura 31 se observa un talud de tamaño moderado que tuvo una falla rotacional con una longitud de la corona de aproximadamente de 3 metros, se observa el cono de deyección, el cual aumenta el riesgo en el talud derecho de la carretera.

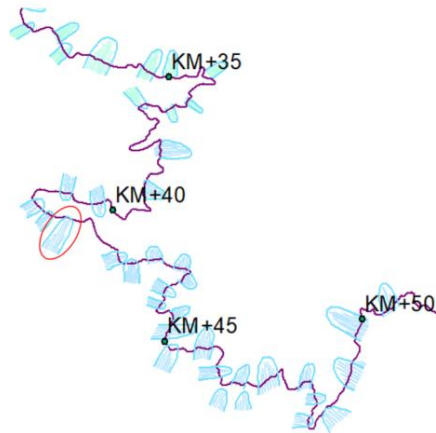


Figura 33. Localización del talud asociado al evento presentado en cercanías del kilómetro 42

En la tabla 17 se enuncian las propiedades geométricas del talud asociado al derrumbe mencionado como también su factor de seguridad y su probabilidad de falla.

Tabla 16.

*Propiedades del talud asociado al evento del Km42*

| <b>Km talud</b> | <b>HLD</b> | <b>LLD</b> | <b>FS</b> | <b>PF (%)</b> |
|-----------------|------------|------------|-----------|---------------|
| <b>42</b>       | 200        | 422,04     | 0,67      | 96,02         |

## 6. Conclusiones

En este proyecto, se aplicó la MTN para realizar una primera aproximación al entendimiento de las condiciones de estabilidad de un tramo de la vía Curos- Málaga. Dentro de los aspectos más relevantes se tienen:

A pesar de contar con información topográfica a escala 1:50000 y no 1:2000 como es recomendable, se pudieron obtener los rasgos geométricos necesarios para el análisis metodológico. Lo anterior, se pudo comprobar con al menos 12 sitios críticos observados en la visita de campo, donde los factores de seguridad incondicionales determinados con la MTN coincidieron con la condición actual.

Se realizaron un total de 15 mapas de zonificación, 3 para cada uno de los 5 escenarios que se estudiaron en este caso, los cuales se encuentran desde la abscisa 00, ubicada en la intersección de la vía Curos Guaca con la vía principal Piedecuesta-San Gil hasta el km 61,145, donde se observó que los últimos 10 kilómetros registraban factores posiblemente anómalos, acto que se confirmó en el reconocimiento de campo y validación de datos realizada, dado que los últimos 7 kilómetros corresponden a una familia diferente a la estudiada se tuvo entonces que limitar el mapa de zonificación hasta el kilómetro 53.8

Se encontró una correlación favorable entre los mapas obtenidos por el método MTN y el reconocimiento en campo, donde los taludes con factores de seguridad altos corresponden a zonas con taludes rocosos y gran pendiente, y los taludes con factores de seguridad bajos corresponden a deslizamientos activos o bien a zonas estabilizadas generalmente

### Referencias Bibliográficas

- Alcocer S., S. S., Salinas, C., Echavarría, A., & Mendoza, M. (1996). *Inestabilidad de laderas Centro Nacional de Prevención de Desastres, 1a edición*. Mexico DF.
- Castellanos R., G. A. (1997). *Algunas relaciones de precipitación crítica-Duración de lluvias que disparan movimientos en masa en Colombia*. Rio de Janeiro.
- Coates, D. R. (1981). *Environmental Geology*.
- González A., J. (s.f.). *Relaciones de Precipitación Crítica - Duración de Lluvias que Disparan Movimientos de Masa en Santafé de Bogotá - Colombia*.
- Gonzalez, A. (2016). The Natural Slope Methodology (NSM), an efficient tool to estimate landslide relative hazard parameters. *Landslides Eng. Slopes. Exp. Theory Pract.*, 1003–1010.
- González-García, A. J., & Mayorga-Márquez. (1997). *Thresholds for rainfall events that induce landslides in Colombia*.
- Lara M., S. S. (2008). Remociones en masa en Chile (mass wasting in Chile). *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, vol. 31, no. 3, 159–159.
- Moya P., M. E. (2018). Determinación del parámetro número de curva en la cuenca Las Coloradas en un entorno SIG. *Ing. Hidráulica y Ambient.*, vol. 39, no. 2, 60–71.
- Shuk E., J., & G.-G. A., T. (1993). *Quantification of Slope Instability Risk and Cost Parameters for Geotechnical Applications in Highway Project and in a Regional Study*.
- Shuk E., T. (1990). *La evolución y el estado actual de la metodología basada en taludes naturales*

*para análisis de estabilidad en masas de materiales geológicos.*

Shuk, E. (1999). *Zonificación geotécnica cuantitativa por medio de la metodología de taludes naturales.*

Soulis, K. X., & Valiantzas, J. D. (2012). SCS-CN parameter determination using rainfall-runoff data in heterogeneous watersheds-the two-CN system approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 16, no. 3, 1001–1015.

V. M. T. (2002). El clima en la Inestabilidad de laderas,” . *Statew. Agric. L. Use Baseline vol. 1.*

Vargas R, M. (2016). Proyecto actualización componente de gestión del riesgo para la revisión ordinaria y actualización del plan de ordenamiento territorial. *Inst. Dist. Gestión Riesgos y Cambio Climático IDIGER*, vol. 147, 11–40.