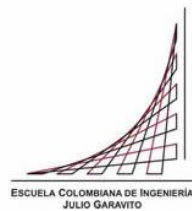


Maestría en Ingeniería Civil

**“Análisis de la Influencia de Factores Geotécnicos de Suelos en la
Susceptibilidad a Deslizamientos”**

Fabio Andrés Tejada Beltrán

Bogotá, D.C., 07 de Diciembre de 2020

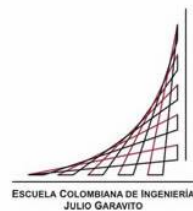


**“Análisis de la Influencia de Factores Geotécnicos de Suelos en la
Susceptibilidad a Deslizamientos”**

**Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en Geotecnia**

**Ing. Civil, PhD, MSc. Carlos Eduardo Rodríguez Pineda
Director**

Bogotá, D.C., 07 de Diciembre de 2020



La tesis de maestría titulada “Análisis de la Influencia de Factores Geotécnicos de Suelos en la Susceptibilidad a Deslizamientos”, presentada por Fabio Andrés Tejada Beltrán, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'CARLOS', with a large, sweeping flourish above it.

Director de la tesis

Ing. Civil, PhD, MSc. Carlos Eduardo Rodríguez Pineda

Jurado

Ing. Civil, MSc. Lina Ximena Garzón Ávila

Jurado

Ing. Civil, José Vicente Amortegui Gil

Bogotá, D.C., 07 de diciembre de 2020.

Resumen

En muchas de las investigaciones donde se realiza evaluación de amenaza y susceptibilidad de suelos a movimientos en masa, no se incluyen de forma directa los factores geotécnicos en la determinación de la influencia que tienen estos parámetros en la ocurrencia del evento; esto conlleva a que no se tenga una adecuada caracterización de los elementos que inciden en el mismo, y que de una u otra forma pueden aportar al desarrollo o proliferación de este tipo de fenómenos naturales propios de terrenos con alta pendiente. Se busca entonces la inclusión de estos aspectos, haciendo una recopilación de historia de casos de deslizamientos que estén documentados, donde se hayan identificado parámetros geotécnicos que pudieron haber coadyuvado a su desarrollo; esperando encontrar valores típicos en distintos rangos, los cuales permitirán comparar condiciones reales de eventos estudiados en diversas partes, permitiendo servir de base para los análisis correspondientes.

En virtud a lo anterior, se desea fortalecer la parte de caracterización de la susceptibilidad tratando de incluir aspectos geotécnicos en la evaluación de casos; para ello se toma como referencia lo estipulado en la Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa a Escala 1:25.000 del Servicio Geológico Colombiano (SGC), donde se analiza la amenaza mediante un modelo estadístico sin evaluar el aporte que tienen algunos parámetros geotécnicos en la ocurrencia del evento. De igual forma, la susceptibilidad se establece a partir de condiciones topográficas y geológicas de un área determinada, la cual se complementa con el conocimiento de deslizamientos que hayan ocurrido en dichos lugares (se evalúa la relación entre los deslizamientos y la geomorfología del terreno), sin tratar a fondo el aporte intrínseco de los elementos descritos anteriormente.

Teniendo en cuenta que la mayoría de casos documentados que se encontraron se dan en suelos residuales y coluviales, la presente investigación se enfoca en dichos materiales, que una vez seleccionados, revisados y modelados, son analizados para poder conocer la influencia de los parámetros geotécnicos (Φ y C) y propiedades índices (límites de consistencia y granulometría), que arrojan unos rangos que son examinados o correlacionados con unas pendientes, permitiendo inferir un nivel de susceptibilidad antes que ocurra el evento.

Como resultados generales, después de realizar un análisis incluyendo los parámetros anteriormente descritos encontrados en los deslizamientos estudiados, se pudo determinar la existencia de inestabilidad en depósitos coluviales con pendientes entre el 20% y el 38%, ángulos de fricción menores a 39° y cohesiones menores que 31 kPa; en suelos residuales los ángulos de fricción varían entre 19° y 23° para suelos de comportamiento cohesivo, y entre 24° y 34° para suelos granulares, con

cohesiones menores a 51 kPa y pendientes entre el 10% y el 67%. En los suelos coluviales se encontró una relación inversamente proporcional del FS con respecto a todas las propiedades geotécnicas analizadas. Por su parte, en los suelos residuales, se presentaron tendencias proporcionales con respecto al índice de plasticidad, límite líquido y ángulo de fricción; en cuanto a la humedad, el límite de plasticidad y cohesión, la tendencia es inversa.

ÍNDICE GENERAL

Introducción	1
Situación Problema	2
Planteamiento del Problema.....	6
Justificación.....	8
Objetivos	10
General	10
Específicos	10
Metodología	10
Fase 1: Búsqueda de Historia de Casos de Deslizamientos	10
Fase 2: Realización de Modelaciones Numéricas	11
Fase 3: Formulación de Rangos de Parámetros Geotécnicos (Φ y C) y propiedades índices (límites de consistencia y granulometría) para la Evaluación de amenaza.....	11
Capítulo I Marco teórico y antecedentes	13
1.1. Marco teórico	13
1.1.1 Tipos de suelos en estudio.	13
1.1.1.1 Suelos residuales.	13
1.1.1.2 Suelos coluviales.	20
1.1.1.3 Propiedades geomecánicas de los suelos y rocas	24
1.1.2 Clasificación de los deslizamientos	26
1.1.2.1 Caídas	29
1.1.2.2 Volcamiento	30
1.1.2.3 Deslizamiento	31
1.1.2.3.1 Deslizamiento rotacional.	31
1.1.2.3.2 Deslizamiento traslacional.....	31
1.1.2.3.3 Propagación lateral.	32
1.1.2.4 Flujos.....	32
1.1.2.4.1 Flujo de suelos.....	33

1.1.2.4.2	Flujo de rocas.	33
1.1.2.4.3	Flujo de detritos.	34
1.1.2.4.4	Deslizamientos complejos.	34
1.1.3	Métodos de análisis en geotecnia.	34
1.1.3.1	Método Bishop.	38
1.1.3.2	Método de Janbu.	38
1.1.3.3	Método de elementos finitos.	39
1.2.	Marco de Antecedentes.	41
1.2.1.	Susceptibilidad y amenaza por deslizamientos.	41
1.2.2.	Enfoques metodológicos para el análisis de susceptibilidad.	43
1.2.2.1.	Métodos Heurísticos.	44
1.2.2.2.	Métodos Estadísticos:	52
1.2.2.3.	Métodos Determinísticos:	56
1.2.2.4.	Lineamientos de referencia para el análisis de susceptibilidad y zonificación de amenaza.	57
Capítulo II	Estudio de Casos y Análisis de Resultados.	75
2.1	Estudio de casos.	75
1.	Estudio de un caso sobre la causa del deslizamiento en Santa Clara, California, EE. UU.	75
2.	Deslizamiento en Zhenxiong, Yunnan, suroeste de China.	75
3.	Análisis de estabilidad para el deslizamiento en el distrito de Pune, India.	75
4.	Los deslizamientos de la cuenca baja del río Darro.	75
5.	Métodos de monitoreo en los deslizamientos Montes Cárpatos, Polonia.	75
6.	Modelación numérica del efecto de la lluvia en el deslizamiento de Azazga, Argelia.	75
7.	Comportamiento de una pendiente coluvial ubicada en el sureste de Brasil.	76
8.	Investigación del deslizamiento Fu Yung Shan Tsuen, Hong Kong.	76
9.	Caracterización geotécnica y análisis numérico del deslizamiento de Sarak en India.	76
10.	Análisis de estabilidad del deslizamiento Portalet en los Pirineos.	76
11.	Deslizamientos en las cuencas del noreste margen de la meseta tibetana.	76
12.	Evaluación de la estabilidad de un talud de alta pendiente en un deslizamiento en Turquía.	76

13.	Estabilización del deslizamiento de Cortiana en el noreste de Italia.....	76
14.	Estudio del caso en un deslizamiento en el sur de Italia.	76
15.	Estudio de deslizamientos en temporada de lluvias con análisis numérico.	76
16.	Estudio de análisis de estabilidad en una zona de alta complejidad en los Alpes Italianos.	76
17.	Modelación con elementos finitos para la evaluación de la estabilidad de taludes de roca y detritos.	76
18.	Análisis de un deslizamiento de suelo residual en Rio de Janeiro, Brasil.....	76
2.2	Análisis de Resultados	76
2.2.1	Depósitos Coluviales.....	79
2.2.1	Depósitos Residuales.....	91
Capítulo III. Metodología Propuesta para la determinación de la susceptibilidad incluyendo factores geotécnicos en su análisis.....		103
Conclusiones		119

Índice de Figuras

Figura 1. Proceso de Meteorización. (Suárez, 2009).....	14
Figura 2. Depósito coluvial. (González, 2002).....	21
Figura 3. Falla en suelos coluviales. (Suárez, 1998)	24
Figura 4. Malla típica para el análisis de un talud vertical por elementos finitos según (Ashford y Sitar 1994). (Escobar & Duque, 2016).	40
Figura 5. Zonificación de amenaza a los deslizamientos (Suárez, 1998).....	42
Figura 6. Marco de referencia para el análisis de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25:000. (SGC, 2017).....	58
Figura 7. Modelo conceptual para el cálculo de susceptibilidad. (SGC, 2017).....	64
Figura 8. Esquema de variables geométricas de la capa de falla, superficie de falla y nivel freático.....	85
Figura 9. Definición de unidades.....	114
Figura 10. Mapa de pendientes.....	114
Figura 11. Inventario de deslizamientos.....	115

Índice de Gráficas

Gráfica 1. Gráfica de pendiente vs Factor de Seguridad.	78
Gráfica 2. Gráfica de pendiente vs Factor de reducción de resistencia	78
Gráfica 3. Factor de seguridad y reducción de resistencia obtenidos en cada caso.....	79
Gráfica 4. Variación del factor de seguridad con los parámetros de clasificación en suelos coluviales. Índice de plasticidad y humedad en eje vertical izquierdo, contenido de finos en eje vertical derecho. Los círculos vacíos corresponden a suelos granulares.	82
Gráfica 5. Variación del factor de seguridad con los parámetros de resistencia en suelos coluviales.....	83
Gráfica 6. Variación de los parámetros de resistencia con la pendiente en suelos coluviales	84
Gráfica 7. Variación en profundidades y nivel freático, en suelos cohesivos	86
Gráfica 8. Variación en profundidades y nivel freático, en suelos granulares	86

Gráfica 9. Profundidades y nivel freático por caso	87
Gráfica 10. Variación del FS con respecto a al espesor de la capa de falla, profundidad de falla y nivel freático.....	88
Gráfica 11. Variación del FS contra el nivel freático en los casos con suelos cohesivos.....	89
Gráfica 12. Variación del FS contra el nivel freático en los casos con suelos cohesivos.....	90
Gráfica 13. Nivel freático requerido para la falla y FS con el nivel freático en superficie ..	90
Gráfica 14. Variación del factor de seguridad con los parámetros de clasificación en suelos residuales.....	93
Gráfica 15. Variación del factor de seguridad con los límites de Atterberg.....	94
Gráfica 16. FS contra índice de liquidez y consistencia.....	95
Gráfica 17. Variación del factor de seguridad con los parámetros de resistencia en suelos residuales.....	96
Gráfica 18. Variación de los parámetros de resistencia con la pendiente en suelos residuales	97
Gráfica 19. Variación en profundidades y nivel freático, en suelos cohesivos	98
Gráfica 20. Variación en profundidades y nivel freático, en suelos granulares	98
Gráfica 21. Profundidades y nivel freático por caso	99
Gráfica 22. Variación del FS con respecto a al espesor de la capa de falla, profundidad de falla y nivel freático.....	100
Gráfica 23. Variación del FS contra el nivel freático en los casos con suelos cohesivos...	101
Gráfica 24. Variación del FS contra el nivel freático en los casos con suelos cohesivos...	101
Gráfica 25. Nivel freático requerido para la falla y FS con el nivel freático en superficie	102

Índice de Tablas

Tabla 1. Aspectos que influyen en la Meteorización Física o Mecánica.....	15
Tabla 2. Factores que controlan la Meteorización Química.	16
Tabla 3. Procesos y productos de descomposición.....	17
Tabla 4. Perfiles de meteorización de diferentes tipos de roca y diferentes condiciones ambientales.....	19
Tabla 5. Aspectos más importantes que afectan los suelos coluviales.	21
Tabla 6. Módulo de Young y relación de Poisson para diferentes tipos de suelo	25

Tabla 7. Módulo de Young y relación de Poisson para diferentes tipos de roca.....	25
Tabla 8. Síntesis de la propuesta de la actualización de la clasificación de deslizamientos de Varnes desarrollada por Hungr, Leroueil y Picarelli.....	27
Tabla 9. Clasificación de procesos que inducen deslizamiento.....	29
Tabla 10. Métodos de análisis de estabilidad de taludes.....	35
Tabla 11. Pesos para evaluar la susceptibilidad de rocas a los deslizamientos.....	44
Tabla 12. Valoración de factores para la evaluación de susceptibilidad a los deslizamientos debidos a lluvias.....	46
Tabla 13. Índices para el análisis de susceptibilidad.....	47
Tabla 14. Valores relativos para la ocurrencia de deslizamientos.....	48
Tabla 15. Pesos de los diferentes factores para tener en cuenta en la evaluación de amenazas por deslizamientos.....	48
Tabla 16. Ventajas y desventajas del Método Heurístico.....	52
Tabla 17. Ventajas y desventajas de los Métodos Estadísticos.....	55
Tabla 18. Ventajas y desventajas de los Métodos Determinísticos.....	57
Tabla 19. Factores y temáticas para la caracterización geoambiental del área de estudio y zonificación de amenaza por movimientos en masa propuestos en esta metodología.....	59
Tabla 20. Unidades Geológicas Superficiales (UGS) según su origen.....	61
Tabla 21. Contenido de la leyenda del mapa de susceptibilidad.....	64
Tabla 22. Escalas y nivel de la zonificación según el propósito.....	69
Tabla 23. Escalas de zonificación y aplicaciones.....	70
Tabla 24. Descriptores ejemplo para la zonificación de susceptibilidad a deslizamientos.....	71
Tabla 25. Recomendaciones para la zonificación de susceptibilidad.....	72
Tabla 26. Resumen de resultados.....	76
Tabla 27. Resumen de resultados depósitos coluviales.....	80
Tabla 28. Variación de las propiedades geotécnicas de suelos coluviales en deslizamientos.....	80
Tabla 29. Resumen de resultados, suelos residuales.....	91
Tabla 30. Variación de las propiedades geotécnicas de suelos residuales en deslizamientos.....	92
Tabla 31. Índice de consistencia y liquidez.....	94
Tabla 32. Pesos según el FS para cada categoría.....	107

Tabla 33. Tendencia de cada parámetro geotécnico estudiado con respecto al factor de seguridad	108
Tabla 34. Pesos asignados a pendientes de suelos coluviales	108
Tabla 35. Pesos para las propiedades índices de suelos coluviales	109
Tabla 36. Pesos asignados a pendientes de suelo residual	109
Tabla 37. Pesos para las propiedades índices de suelos residuales	110
Tabla 38. Categorización de la susceptibilidad a deslizamientos para suelos residuales y cohesivos de acuerdo con el índice de susceptibilidad.....	112
Tabla 39. Perfil estratigráfico	116
Tabla 40. Propiedades índices del suelo residual	116
Tabla 41. Pesos asignados a pendientes de suelo residual	117
Tabla 42. Pesos para las propiedades índices de suelos residuales	118

Introducción

Uno de los fenómenos naturales que mayor genera impacto negativo sobre las poblaciones e infraestructura existente a nivel mundial, son los movimientos en masa, que generalmente se dan en zonas de terrenos escarpados o de alta pendiente, en los cuales influyen las lluvias, los movimientos sísmicos, actividades antrópicas, entre otros elementos que inciden en la estabilidad de laderas existentes en cada rincón del planeta; este tipo de problemática deja consigo unos huellas enormes que afectan la economía y vulneran la vida de las personas que habitan en las zonas aledañas a los sitios de incidencia donde su ocurrencia deja devastación, causando retraso y marginación de toda una sociedad. Es por ello que los diferentes entes gubernamentales a nivel mundial, a través de los años y a partir de la ciencia, se han preocupado por mitigar los riesgos que genera la presencia de dichos fenómenos, por lo cual han procurado avanzar en la caracterización, evaluación y solución de este tipo de problemas, a través de múltiples investigaciones con las que se cuentan a la fecha, las cuales permiten una catalogación de zonas susceptibles que facilitan la identificación de amenazas y contribuyen a dar soluciones a posibles eventos de esta índole.

En ese sentido, frente a estas amenazas que generan un riesgo latente en regiones montañosas, es necesario destacar que normalmente en las investigaciones en las que se evalúa la susceptibilidad por deslizamientos, no se incluyen de forma directa los factores geotécnicos en la determinación de la influencia que tienen estos parámetros en la ocurrencia del evento, de este modo se considera importante tener en cuenta estas propiedades al momento de evaluar casos de deslizamiento, ya que permitiría fundamentar de mayor forma los criterios técnicos estimados en los análisis requeridos para tal fin. Como referente en el país, se tiene la “Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25.000” del Servicio Geológico Colombiano (SGC), donde se detallan lineamientos procedimentales para realizar estudios en las zonas de relieve escarpado, en la cual se emplean metodologías comúnmente utilizadas que no contemplan los aspectos anteriormente descritos; se busca entonces con esta investigación dar un pequeño aporte al conocimiento en esta rama de la ingeniería, en la forma en que se caracteriza la susceptibilidad, contribuyendo con la seguridad, el bienestar y la preservación de la vida de las personas asentadas en posibles zonas inestables.

Para llevar a cabo la investigación, se realizó una búsqueda y revisión de historia de casos documentados de deslizamientos que se registraron en algunas partes del mundo, seleccionando los que tuvieran información que permitiera comparar factores geotécnicos (Φ y C) y propiedades

índices (límites de consistencia) en la evaluación del evento; posteriormente se tomaron los datos descritos para utilizarlos en los programas de métodos numéricos y de estabilización de taludes respectivamente, donde se modelaron las condiciones y factores encontrados que influyeron en la inestabilidad de cada caso, en la cual se analizó el grado de aporte de tales valores en la ocurrencia del deslizamiento, determinando con esto unos rangos de parámetros geotécnicos conforme a unas pendientes en las que se presentó mayor inestabilidad. Conocer esta información, sirve como criterio en la evaluación de la susceptibilidad y amenaza antes de un deslizamiento, ya que otorga mayores bases en análisis por el hecho de contemplar aspectos propios del suelo que influyen en los movimientos en masa, que hoy son someramente manejados por los métodos existentes.

Por su parte, esta investigación aborda el problema, la justificación, objetivos y desarrollo de todos los aspectos de su alcance, manejando de manera general los siguientes tres (03) capítulos, así

Capítulo 1 (Marco de Referencia): En este capítulo se describe el marco de referencia base utilizado para la investigación, así como las generalidades el fundamento teórico que permite la correlación de conceptos y postulados para el desarrollo de la misma.

Capítulo 2 (Estudio de Casos y Análisis de Resultados): Se describen los casos de estudio seleccionados con los aspectos técnicos más relevantes de cada uno, donde además se muestran las modelaciones efectuadas con sus respectivos análisis.

Capítulo 3 (Metodología Propuesta para la determinación de la susceptibilidad incluyendo factores geotécnicos en su análisis): Con los resultados obtenidos y después de establecer unos criterios, se propone una metodología donde se describa la forma en que se podrían emplear los parámetros geotécnicos en la determinación de la susceptibilidad

Situación Problema

Los problemas relacionados con desastres naturales, especialmente de deslizamientos, presentan en la actualidad un riesgo global debido a su elevado aumento, particularmente en los países que tienen niveles de desarrollo medio y bajo, tal como se afirma en el estudio desarrollado por Anderson y Holcombe (2013). Para estos autores el problema es multicausal, siendo, entre otros, causados por las actividades relacionadas con el desarrollo (minería, agricultura,

construcción) que vienen perturbando el medio ambiente; el cambio climático producto de la acción antropogénica; exposición y vulnerabilidad como consecuencia de factores socioeconómicos y ambientales (pobreza, hambrunas, sequía) y un aumento en el costo de los desastres que impiden desarrollar significativas inversiones para la generación y recuperación de las poblaciones (Anderson M, 2013).

Dentro de estos riesgos de desastres naturales, se encuentran “Los deslizamientos causados por precipitaciones que representan una amenaza significativa a la vida, propiedad y desarrollo, aunque no sean reportados, especialmente en el Sureste de Asia y América Latina y el Caribe” (Anderson M, 2013, p. 9). Según este autor, hay aproximadamente dos millones de personas en el mundo que se encuentran en riesgo por deslizamientos, aun cuando se precisa que estos datos dependen también de los eventos de precipitación que se presenten y que son los que realmente desencadenan los desastres; sumado a estos factores, se encuentran también los agentes antrópicos, que mediante las actividades de desarrollo, incrementan los movimientos de tierra (desmontes, rellenos, construcción, entre otros).

En el caso de Suráfrica, la lluvia ha sido uno de los factores que pueden incidir en la generación de desastres producto de deslizamientos de tierra: “cuando el evento lluvioso alcanza el 12% de la lluvia promedio anual, existe una probabilidad alta de que se presenten deslizamientos; cuando alcanza el 16%, ocurren deslizamientos importantes y cuando alcanza el 20%, se producen deslizamientos catastróficos” (Suárez, Deslizamientos - Análisis geotécnico., 2009, p. 51) Se plantea por este autor que este tipo de fenómenos naturales corresponden a tendencias planares y oleadas de materiales coluviales con un espesor entre 1 a 2 metros en zonas en donde los suelos son relativamente permeables; los ejemplos de este tipo de movimientos en masa suelen presentarse en ciudades como Hong Kong, en el que las lluvias son superiores al 20% del promedio anual.

Precisamente, para evaluar el nivel de incidencia de los deslizamientos causantes de desastres, la Comisión Económica para América Latina (CEPAL) publicó en 2013 un informe sobre el impacto que tienen en la región este tipo de eventos, cuyos resultados muestran un panorama complejo y preocupante: “La mayoría de los desastres estudiados por la CEPAL son de origen climático - meteorológico e hidrológico - o geofísico, y entre 1972 y 2011 fueron responsables de 311.127 fallecimientos que afectaron alrededor de 34 millones de personas y provocaron un impacto económico total de aproximadamente 210.000 millones de dólares reales, de los cuales,

140.000 millones de dólares reales corresponden a daños y 70.000 millones de dólares reales a pérdidas” (CEPAL, 2014, p. 19).

Los datos reportados muestran que los desastres naturales tienen un fuerte impacto en la región, de ahí que se buscó identificar el origen de los mismos, siendo los más importantes los siguientes: los formados por procesos dinámicos en el interior de la tierra (sismos, maremotos, erupciones volcánicas), los creados por procesos dinámicos en la superficie de la tierra (deslizamientos de tierra, derrumbes, aludes y aluviones, etc.), los generados por fenómenos meteorológicos e hidrológicos (inundaciones, sequías, tornados, granizadas, etc.), y los de origen biológico (plagas, epidemias) (CEPAL, 2014). Este panorama permite afirmar que tales amenazas se encuentran interrelacionadas y presentan una dinámica compleja que, cuando ocurren, causan afectaciones y alteraciones profundas en la vida de quienes son víctimas de estos sucesos.

Esa dinámica e interrelación entre estas amenazas se hizo evidente en el deslizamiento de tierra ocurrido en el barrio La Colina de la ciudad de San Salvador en 2001, el cual fue generado por dos elementos; un terremoto o sismo de 7.6 grados en escala de Richter, que incidió en un área que se encontraba deforestada. Es decir, que un proceso dinámico al interior de la tierra provocó otro en la superficie con los respectivos efectos y daños en la población que allí se encontraba, dejando 536 personas muertas y 300 viviendas destruidas (Codina, 2015).

Igualmente, las lluvias son también otro de los factores que más ha incidido en desastres ocurridos en América Latina, tal como lo evidencia el estudio realizado por Suárez (2010), en el que se muestra cómo este fenómeno natural fue un antecedente significativo a tres eventos catastróficos en sitios con características muy diversas, donde influyó el efecto de la lluvia acumulada. Estos casos fueron los de Vargas en Venezuela (1999), Pajarito – Boyacá en Colombia (2005) y la Cuenca de Angulito en Girón - Santander - Colombia en 2005.

En el caso específico de Colombia, Hidalgo y Vega (2014) subrayan que debido a las condiciones y características geográficas y fisiográficas del territorio, se generan riesgos de desastres naturales, particularmente de deslizamientos, producto tanto de factores naturales como antrópicos; como es el caso del Valle de Aburrá: “Medellín y los municipios vecinos, en cuanto a relieve, clima, topografía, geología, entre otros, hacen a la región susceptible de la ocurrencia de procesos geo-morfodinámicos, que pueden afectar tanto a la población como a su infraestructura” (Hidalgo, 2014, p. 104).

Estos niveles de afectación generados por deslizamientos también han sido abordados por Arias (2012), quien muestra cómo los deslizamientos en Colombia son producidos por las altas precipitaciones que se presentan en vías intermunicipales, los cuales causan impactos de carácter ambiental, socioeconómico y técnico. Respecto a las causas, se reitera lo señalado por los anteriores autores, en cuanto a que esto es ocasionado por agentes naturales o antrópicos (Arias, 2012); Colombia ha sido entonces, uno de los países que se ha visto afectado por desastres de gran magnitud, producidos por deslizamientos de tierra, siendo uno de ellos el ocurrido en el barrio Villatina en Medellín en 1987, cuando se deslizaron más de 20.000 metros cúbicos de tierra, el cual originó alrededor de 500 muertos, 200 desaparecidos y un aproximado de 2.400 damnificados (CEPAL, 2014).

Otro de estos casos memorables fue el deslizamiento y avalancha de miles de toneladas de tierra, árboles y rocas, generados por la erupción del volcán Nevado del Ruiz en 1985, que terminó sepultando casi en su totalidad el municipio de Armero:

El área cubierta por los sedimentos fue de 3.387 hectáreas (33,87 km²); el volumen total del material transportado hasta el Valle de Armero, incluidas las fases líquida y sólida, se estima en cerca de 80 millones de metros cúbicos; según cifras oficiales la catástrofe de Armero causó entre 22.800 y 25.000 muertos, de 4.500 a 5.000 heridos y unos 7.100 a 9.000 sobrevivientes ilesos que quedaron sin vivienda; en tanto que los daños materiales (vías, cultivos, contaminación de aguas, destrucción de distritos de riego) sobrepasarían los 30.000 millones de pesos (Mojica “et al”, 1985, p. 108).

Hace un par de años, otro de los desastres naturales generado por deslizamientos, correspondió a la emergencia presentada en el municipio de Mocoa, en abril de 2017, el cual dejó un total de 322 personas fallecidas, 398 heridos y un total de 7.603 personas damnificadas. En este caso, la principal causa del desastre obedeció a actividades antrópicas originadas por el cambio de la cobertura vegetal natural por sembrados de café y plátano, actividades de minería y ganadería intensiva; lo que provocó que la tierra dejara de absorber lluvias torrenciales generadas en ese momento (Marulanda, 2017).

Por su parte, Ávila y otros autores (2016) manifestaron que la mayoría de los problemas relacionados con la estabilidad de los taludes dependen principalmente de unos factores condicionantes, entre los cuales se pueden encontrar los factores geológicos (litología, estructura y meteorización), geomorfológicos (morfogénesis, morfometría y morfodinámica), y cobertura de la

superficie. Así mismo, existen unos agentes contribuyentes (humedad, pérdida de cobertura vegetal y sobrecarga), y todos ellos están asociados a factores internos que producen los deslizamientos; de ésta forma también existen factores externos que inducen a la falla entre los que se encuentran las lluvias, sismos e intervención antrópica, tal como se había descrito anteriormente (Avila G. C., 2016).

Por otro lado Highland y Bobrowsky (2008), expresaron que gran cantidad de zonas pendienteadas y/o laderas, se encuentran en condición potencial de inestabilidad, de modo que se pueden generar movimientos con facilidad, debido a la presencia de múltiples componentes que hacen que de una u otra forma se vulnere la estabilidad de la masa de suelo, entre ellos se puede destacar la resistencia de los materiales que conforman la masa, propiedad que está influenciada por la presencia de sistemas de debilidad como diaclasas, fallas, fracturas, entre otras que implican una inestabilidad latente; de igual forma también está la erosión que juega un papel importante en la estabilidad o equilibrio, y la actividad sísmica que es un factor detonante en la ocurrencia de este tipo de desastres naturales, debido a que el planeta tierra a través de los siglos ha estado en constante movimiento tectónico.

En síntesis, de acuerdo con lo descrito en el análisis global, regional y local, se puede evidenciar cómo la problemática generada por los deslizamientos crea procesos de inestabilidad de la tierra, causando un peligro natural de gran envergadura que se da en todo el mundo, de ahí que se pueda pensar que corresponde a una de las más importantes amenazas que originan desastres. Tal como se evidenció, la ocurrencia de estos fenómenos de deslizamientos de tierra (derrumbes, caídas, flujos, etc.) que dejan centenares de damnificados (muertos, heridos, desaparecidos) así como cuantiosas pérdidas materiales y económicas que deterioran y generan vulnerabilidad en el desarrollo de la sociedad.

Planteamiento del Problema

El problema central que se desea plantear con la presente investigación, es que frente a estas amenazas y riesgos de deslizamientos, en la mayoría de investigaciones donde se evalúa la amenaza y/o susceptibilidad por deslizamientos, no se incluyen de forma directa los factores geotécnicos en la determinación de la influencia que tienen estos parámetros en la ocurrencia del evento, y tampoco se tienen parámetros base o escala de valores de este tipo que permitan comparar condiciones reales

de estudios con casos que hayan ocurrido en otros lugares, lo cual permitiría dar una referencia en la evaluación integral de los estudios; caso ejemplo la “Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25.000” del Servicio Geológico Colombiano (SGC), el cual asumió, entre otros aspectos, la evaluación de amenaza por movimientos en masa, más específicamente por deslizamiento, tomando como referencia lo ocurrido en el municipio de Mocoa, Putumayo en el año 2017. En este trabajo se planteó la necesidad de llevar a cabo estudios geotécnicos detallados en cuanto a las medidas estructurales y no estructurales, pero omiten mencionar o recomendar estudios que identifiquen los factores geotécnicos generadores de un movimiento en masa, sin hacer una identificación de los rangos de parámetros geotécnicos que permitan inferir un nivel de amenaza antes de que ocurra el evento, siendo esta la problemática principal a abordar en esta investigación.

Igual sucede en la contribución de Almaguer y otros autores (2013), quienes hacen una evaluación de susceptibilidad por deslizamientos en un sector del Municipio de Moa – Cuba, estableciendo una metodología que, si bien incluye un estudio geotécnico, él mismo se limita únicamente al tipo de suelo, las propiedades físico mecánicas y al factor de seguridad, pero no tiene en cuenta realmente la relación o grado de influencia de los factores geotécnicos, como tampoco los parámetros de resistencia que serían necesarios para un análisis profundo de susceptibilidad. En ese sentido, el estudio tomó aspectos relativos a la resistencia de las rocas, dejando al margen otros que pueden incidir notoriamente en una evaluación de susceptibilidad (Almaguer, 2013).

En esta línea también se ubican aquellas investigaciones que si bien estudian los factores geotécnicos, éstos se llevan a cabo de forma integral con la geología, generando con ello una confusión o falta de identificación clara de los factores geotécnicos. Como caso se tiene el aporte de Campos (2014), quien al hacer una evaluación de susceptibilidad, no logra diferenciar los factores geotécnicos de los geológicos; sumado a ello, cuando aborda el tema de la resistencia al material, no se especifican con claridad cuáles serán los parámetros de resistencia que se deben tomar en cuenta para la evaluación de susceptibilidad (Campos, 2014).

Así mismo, en el estudio de evaluación de susceptibilidad llevado a cabo por Lagorreta y otros autores (2014) en los deslizamientos del volcán Pico de Orizaba en Puebla – México, en el que la geotecnia utiliza parámetros establecidos en SINMAP¹, como son espesor del suelo, gravedad, densidad (agua y suelo), cohesión y ángulo de fricción, sin tomar como base los

¹ **SINMAP:** (StabilityIndexMAPping), Modelo cartográfico-hidrológico utilizado para determinar la susceptibilidad a deslizamientos.

parámetros de resistencia al material. Esto conlleva en afirmar que un mapa de susceptibilidad no se puede desligar de la esencia de lo que es la estabilidad y es la resistencia al material pero en ninguna parte de los estudios hacen el análisis de tal resistencia (Lagorreta, 2014).

En virtud a este panorama, es evidente la importancia que desde la ciencia y sus diversas disciplinas se imponga a esta investigación, la tarea de identificar el grado de influencia de ciertos parámetros geotécnicos (Φ y C) y propiedades índices (límites de consistencia y granulometría) que de una u otra manera influyen en los deslizamientos, los cuales deben contemplarse en la evaluación de susceptibilidad, permitiendo con esto, generar mecanismos de prevención de riesgos ante la existencia permanente de amenaza por deslizamientos en terrenos de alta montaña. En concreto, se requiere del desarrollo de más investigaciones que contribuyan a dar soluciones a problemas geotécnicos respecto a las propiedades que presentan los suelos, particularmente en aquellos ubicados en la región tropical, como es el caso de Colombia, en donde dichos suelos presentan unas características muy particulares; conforme a ello, la pregunta de investigación que se plantea es **¿Cuál es la influencia de los parámetros geotécnicos (Φ y C) y propiedades índices (límites de consistencia y granulometría) en la susceptibilidad de deslizamiento de suelos residuales y coluviales?**.

Justificación

Si bien es cierto que existen investigaciones claras que permiten determinar los factores condicionantes que controlan la susceptibilidad, y con ello la amenaza que generan los deslizamientos, existen parámetros geotécnicos que deben estudiarse para determinar aspectos que inducen a la falla e inestabilidad de laderas y/o taludes, los cuales fueron descritos de manera general en anteriores párrafos; es por eso que por medio del planteamiento de esta investigación, se busca encontrar el grado de incidencia o afectación que generan algunos parámetros geotécnicos como la cohesión y el ángulo de fricción, así como las propiedades índices (límites de consistencia), con el objetivo de tener un mayor criterio al momento de evaluar la posible ocurrencia de falla en un talud.

Sería muy amplio abarcar todos los factores o parámetros que causan la inestabilidad, de este modo se pretende hacer énfasis solamente en algunos tipos de suelos donde más se presenta

estos fenómenos, y que de una u otra forma están mayormente documentados, tales como lo son los residuales y coluviales, donde se analizarán aspectos o parámetros geotécnicos entre los que se describen el ángulo de fricción, la cohesión y propiedades índices (límites de consistencia y granulometría); así mismo verificar la relación de estos factores con una determinada pendiente y con los resultados que se obtengan en el cálculo de los Factores de Seguridad (FS), lo cual permitirá analizar el comportamiento que tiene el deslizamiento con respecto a estos elementos y su grado de influencia en los diferentes escenarios de movimientos en masa estudiados en los diferentes casos. Para ello se empleó el programa de estabilidad de taludes SLIDE (métodos de equilibrio límite) que permite obtener valores de FS y el programa de métodos numéricos PHASE2, que permite conseguir el Strength Reduction Factor (SRF) y observar deformaciones producidas.

En consecuencia, la relevancia de la presente investigación, está en establecer la verdadera importancia que tiene la evaluación de susceptibilidad y/o amenaza, al incluir algunos de los factores o parámetros geotécnicos en el estudio de los movimientos en masa, teniendo en cuenta que, pese a que se tienen bien identificados los agentes detonantes que inciden en la estabilidad de taludes, hay carencias en el análisis de sensibilidad o cuantificación de influencia en la inestabilidad a partir de la relación de los elementos descritos anteriormente.

El desarrollo de este trabajo permite plantear la posibilidad de que por medio de modelos constitutivos y programas, se simulen diferentes escenarios o casos de investigación que se abordaran en el presente documento, lo que coadyuva a efectuar una evaluación del comportamiento que van teniendo las masas de suelo en cada escenario que se estudie, permitiendo comparar el grado de incidencia en la estabilidad por parte de tales propiedades o factores. Esto contribuye a la mejora de los criterios al momento de evaluar problemas en zonas susceptibles de deslizamientos; y así mismo, servirá como herramienta de diagnóstico general para la mitigación o solución acorde con el fenómeno que se presente en particular.

Como caso asociados a lo que se desea desarrollar se encuentra el trabajo de Arias (2012) quien, desde una perspectiva ambiental, señala que la implementación de programas relacionados con el manejo ambiental en sus diversas etapas, puede generar la articulación del mismo con la “gestión de riesgo con la prevención, mitigación y control de los impactos generados, propiciando el uso sostenible del Medio Ambiente” (Arias, 2012, p. 48). En ese sentido, fue importante el estudio de las propiedades geotécnicas de los suelos, con el cual se lograron identificar los factores desencadenantes que actúan sobre la pendiente, como son las lluvias, causas artificiales y la erosión

natural del suelo; igual sucede con el estudio de García (2016), quien también hace una evaluación de susceptibilidad, en el que incluye los factores geológicos y geotécnicos en el control de deslizamientos generado por terremotos en El Salvador.

Objetivos

General

Establecer la relación entre los factores geotécnicos del suelo y la estabilidad de laderas.

Específicos

- Definir en cada uno de los casos estudiados, la influencia que tienen los factores geotécnicos en la ocurrencia del evento.
- Establecer mediante modelaciones numéricas (SLIDE y PHASE2), el grado de influencia de los parámetros geotécnicos en la estabilidad de laderas con unas pendientes determinadas a partir de un análisis gráfico de resultados obtenidos en las modelaciones.
- Proponer una metodología que incluya los factores geotécnicos en la evaluación de la susceptibilidad de ocurrencia de deslizamientos.

Metodología

Para el desarrollo del presente trabajo y cumplimiento de los objetivos de la investigación, se definieron tres (3) fases, tal como se presenta y describe a continuación:

Fase 1: Búsqueda de Historia de Casos de Deslizamientos

Para llevar a cabo esta fase del proyecto, se realiza una búsqueda y revisión de historia de casos documentados de deslizamientos ocurridos en diferentes partes del mundo, donde se hayan determinado y/o analizado la inclusión de factores geotécnicos (Φ y C) y propiedades índices (límites de consistencia) en la evaluación del evento, y en donde también se registre información de pendientes del sitio con sus respectivos perfiles para su posterior modelación. Esto permite la

consolidación o construcción de una matriz de interacción de los factores de interés, identificando los tipos de deslizamientos encontrados y el grado de influencia de sus agentes generadores (solo los estudiados), lo que permite dar una respuesta sobre la determinación de qué parámetros y valores predominan en la ocurrencia de los diferentes casos de deslizamiento.

La búsqueda de información se realiza por medio de consultas en las bases de datos que permite acceder la biblioteca de la Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito”, entre las que se pueden encontrar: ScienceDirect (Elsevier), Compendex (Elsevier), SpringerLink, ScienceJournals (ProQuest), Scopus, EbscoHost, etc. Entre los documentos a consultar se pueden describir algunos así: Revistas: (Landslides, Quaterly Journal of Engineering Geology, Engineering Geology; Canadian Geotecnical); Simposios (Simposios Internacional de deslizamiento, World Landslides Forum, Congresos de deslizamiento, Congresos internacionales de geotecnia), Libros (varios autores), etc.

Fase 2: Realización de Modelaciones Numéricas

Una vez construida la matriz de historia de casos de deslizamientos, en el que se hayan determinado y/o analizado la inclusión de factores geotécnicos (Φ y C) y propiedades índices (límites de consistencia y granulometría) en la evaluación del evento, y donde también se relacionen las pendientes del sitio; se toman los parámetros geotécnicos descritos para utilizarlos en el programa de métodos numéricos y de estabilización de taludes PHASE2 y SLIDE, donde se modelan las condiciones y factores encontrados que influyen en la inestabilidad. Esto permite efectuar un análisis que conlleva a determinar el aporte que tiene cada parámetro en la falla, en el valor del Factor de Seguridad, y en el evento de deslizamiento en general.

Posteriormente se efectúan graficas de casos de los dos tipos de materiales analizados (residuales y coluviales) Φ vs FS (Slide), C vs FS (Slide), Pendiente vs FS (Slide), Φ vs FS (Phase), C vs FS (Phase), Pendiente vs FS (Phase), entre otras, donde se busca ver el grado de incidencia de estos elementos en la ocurrencia del evento, así como la influencia de algunas de las propiedades índices.

Fase 3: Formulación de Rangos de Parámetros Geotécnicos (Φ y C) y propiedades índices (límites de consistencia y granulometría) para la Evaluación de amenaza

Efectuadas las modelaciones en los diferentes escenarios o casos encontrados, y después de haber analizado la influencia de tales parámetros en la ocurrencia del deslizamiento, se determinan unos rangos de parámetros geotécnicos (Φ y C) y propiedades índices (límites de consistencia) conforme a unas pendientes, los cuales sirven de criterio en la evaluación de la susceptibilidad y/o amenaza antes de un deslizamiento.

Capítulo I

Marco teórico y antecedentes

1.1. Marco teórico

Para abordar todo el problema de investigación y dar cumplimiento a los objetivos propuestos, es importante hacer una contextualización o revisión de las bases teóricas de los suelos en estudio (residuales y coluviales), así mismo conocer las generalidades de los deslizamientos más comunes presentes en zonas de pendiente y ladera, donde se busca también describir algunos casos puntuales que hayan sido objeto de estudio, permitiendo con ello, efectuar un análisis del grado de influencia de parámetros geotécnicos, tales como como el ángulo de fricción interna Φ y la cohesión C y propiedades índices (límites de consistencia y granulometría) en la ocurrencia del deslizamiento en una pendiente determinada; así mismo, conocer algunos Métodos de Análisis en Geotecnia que son empleados intrínsecamente por los programas (SLIDE Y PHASE 2) que se van a utilizar para las modelaciones de los casos de deslizamiento. De este modo, se tiene como base teórica lo siguiente:

1.1.1 Tipos de suelos en estudio.

1.1.1.1 Suelos residuales.

De acuerdo con lo expuesto por el Instituto Mexicano del Transporte (1998), los suelos residuales son aquellos que se forman in situ a partir de una roca o material depositado y estabilizado, a partir de un material que no puede ser desplazado por cualquier agente geológico; son el resultado de la alteración de rocas y/o depósitos y de los materiales contenidos en ellos, que no se encuentran en equilibrio en las condiciones de temperatura, presión y humedad del espacio entre la atmosfera y la litosfera. A su vez, este material no ha sido transportado de su ubicación original, manteniendo los planos de debilidad de la roca a determinadas profundidades; es así como el espesor de las capas de este suelo varía con la edad, porcentajes de impurezas y la intensidad de la meteorización, lo cual depende del clima y la pluviometría de la zona donde se encuentren (Cabrera, 2007, pág. 13).

Es la meteorización o también conocida como intemperismo lo que origina este tipo de suelos, que según Duque (2007), se define como la alteración de los materiales rocosos que están expuestos al aire, a la humedad y al efecto de la materia orgánica; se puede encontrar entonces intemperismo mecánico o físico (desintegración), y químico (descomposición), los cuales interactúan conjuntamente al momento de la meteorización. Las variaciones de temperatura y humedad inciden en ambas formas ya que afectan la roca desde el punto de vista mecánico, que con ayuda del agua y el calor, favorece las reacciones químicas que la alteran, de este modo se pueden discriminar cada uno de ellos, tal como se ilustra en la Figura 1.

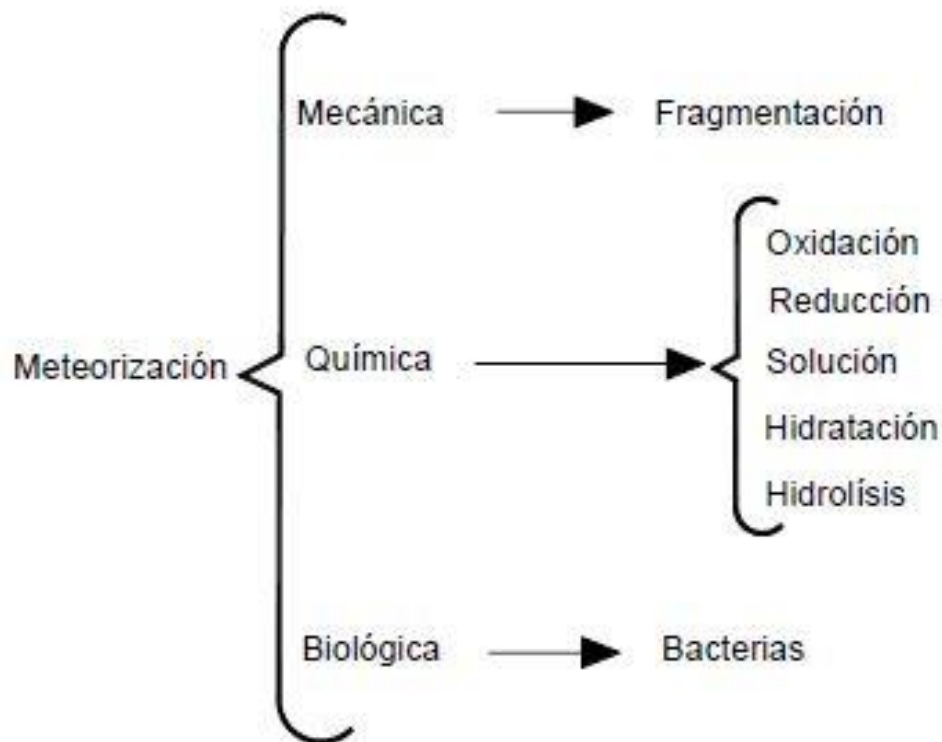


Figura 1. Proceso de Meteorización. (Suárez, 2009)

Meteorización Física o Mecánica: Este fenómeno es causado por procesos físicos, los cuales se desarrollan principalmente en ambientes desérticos y periglaciares. En el caso de climas desérticos se producen porque hay una amplia diferencia térmica entre el día y la noche, que con la ausencia de vegetación, permite que los rayos solares incidan directamente sobre las rocas, mientras

en los ambientes periglaciares las temperaturas varían por encima y por debajo del punto de fusión del hielo, con una periodicidad diaria o estacional (Duque, 2007); en este proceso las rocas se desintegran mecánicamente sin cambios en la composición mineral, lo cual ocurre por la acción de los aspectos descritos en la Tabla 1.

Tabla 1. Aspectos que influyen en la Meteorización Física o Mecánica.

ASPECTO INFLUYENTE	CAUSAS
Expansión y contracción térmica.	Calentamiento y enfriamiento cíclico súbito, (calor de sol, frío de la noche y otras circunstancias), los minerales de muchas rocas se expanden y contraen diferencialmente dando lugar a la desintegración mecánica de las rocas, debido a que los coeficientes de dilatación y contracción cúbica de los minerales difieren mucho de un mineral a otro.
Alivio por descarga.	Muchas rocas expuestas en superficie estuvieron sepultadas en el pasado a más de 20.000 metros de profundidad y quedaron expuestas en los valles por denudación. Debido a estos procesos la presión de confinamiento disminuye y las rocas sufren agrietamientos de tensión en respuesta al alivio por descarga.
Desintegración por Hidro-fracturación.	Al congelarse el agua que penetra en las fracturas, fisuras y en poros de las rocas a 0°C, el volumen se incrementa en un 9%, originando presiones de expansión de aproximadamente 200 MPa, muy superiores a la resistencia de las rocas a la tensión.
Acción de plantas y organismos.	Las raíces de los árboles penetran en las rocas a través de fisuras y grietas y como consecuencia de su crecimiento en grosor y longitud agrandan las grietas donde penetran y crean nuevas fracturas, aflojando las rocas.
Humedecimiento-secado cíclico.	Las lutitas en general se fisuran y deslíen por cambios cíclicos de humedecimiento secado provocados por lluvia e insolación alternos. Al humedecerse estos materiales se hinchan y posteriormente por desecación se contraen y agrietan.

Fuente: (Montero, 2003)

Meteorización Química: Este fenómeno es causado por la disgregación de las rocas y se origina cuando los minerales reaccionan con algunas sustancias presentes en los alrededores, especialmente disueltas en agua, lo que permite la formación de minerales de diferentes composiciones químicas y más estables a las condiciones del exterior. Estos minerales son más susceptibles a esta meteorización cuando tienen enlaces débiles y más lejanas sus condiciones de formación a las del ambiente en la superficie de la Tierra (Duque, 2007, P. 209); este proceso comprende la descomposición de las rocas con formación de nuevos minerales, más livianos y débiles que los minerales originales, lo cual se genera por la acción de los factores y procesos descritos en la Tabla 2 y la Tabla 3.

Tabla 2. Factores que controlan la Meteorización Química.

FACTORES	AGENTES	EFFECTOS
Climáticos	Temperatura	Las reacciones químicas son endotérmicas y por cada 10°C de incremento en la temperatura, la velocidad de las reacciones químicas se duplica y aún se triplica.
	Humedad	El agua es el agente mayor, por cuanto disuelve las rocas y evacua las sustancias disueltas en el proceso de drenaje.
Bióticos	Plantas	La cobertura vegetal protege el suelo ya formado de la erosión y en zonas tropicales produce abundante materia orgánica que moviliza el hierro en el proceso de <i>chelation</i> .
Geomorfológicos y topográficos	Edad del relieve	En regiones jóvenes de la tierra como los Andes Suramericanos, aunque la velocidad de la meteorización es muy alta, la denudación es muy agresiva e impide el desarrollo de los suelos residuales en las regiones más agrestes.
	El relieve mismo	Por otra parte, el relieve controla el drenaje, es decir, el movimiento del agua a través del subsuelo y en superficie. Si hay un buen drenaje, el agua percola el subsuelo a través de las fracturas de las rocas permitiendo el contacto con los agentes atmosféricos que producen la descomposición.

		<p>Los suelos residuales no se desarrollan bien en zonas con altos gradientes donde la denudación es muy fuerte, ni en zonas de topografía muy suave o plana donde el drenaje es muy pobre.</p> <p>Por otra parte, si el relieve es fuerte las laderas se relajan con más facilidad favoreciendo el alivio de esfuerzos y el fracturamiento inicial de las rocas.</p>
Factores geológicos	Tipo de roca	<p>Las rocas cristalinas (ígneas y metamórficas) son más susceptibles a la descomposición que las rocas sedimentarias, las cuales al fin y al cabo están constituidas por minerales que son en su mayoría productos de descomposición.</p> <p>Un caso especial lo constituyen las calizas que se disuelven y forman cavidades de muchos tipos en el subsuelo.</p> <p>De las rocas cristalinas aquellas con abundantes minerales ferromagnesianos, ricos en calcio, hierro y magnesio, como los Basaltos y los Gabros, son más susceptibles que la que posee minerales ricos en sílice, Sodio y Potasio, como los Granitos. El acceso del agua a las rocas es más fácil entre más fracturadas estén.</p>
Factores cronológicos		<p>El Ambiente tectónicos y el ambiente climático han cambiado en la tierra constantemente y en el estudio de suelos residuales es importante tener en cuenta que los suelos de hoy pudieron ser originados en otras condiciones ambientales.</p>

Fuente: (Montero, 2003)

Tabla 3. Procesos y productos de descomposición.

PROCESOS	DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Oxidación	Reacción de los minerales ricos en hierro con el oxígeno disuelto en el agua. El hierro ferroso de muchos silicatos ferromagnesianos se oxida y	A partir de rocas ígneas básicas por ejemplo se forma Hematita, Limonita o Goetita y Gibsita.

PROCESOS	DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
	pasa al estado férrico dando lugar a óxidos e hidróxidos insolubles.	
Hidratación	Adición reversible de agua a ciertos minerales.	La Anhidrita CaSO_4 se transforma en Yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Hidrólisis	Acción del agua en estado iónico sobre los silicatos para formar silicatos hidratados	Se forman las arcillas como la Caolinita (silicato hidratado de Aluminio) o la montmorillonita (silicato hidratado de K, Mg, Fe) y las micas hidratadas como la vermiculita, y la clorita.
Carbonatación	El Anhídrido carbónico se disuelve en el agua y forma ácido carbónico el cual reacciona con minerales ricos en Ca, Mg, Na y K.	Mediante esta reacción se disuelven las calizas. Se forman tubos y cavernas de disolución en ambientes húmedos.
Disolución	Ciertas sustancias se disuelven fácilmente en presencia del agua.	La sal es soluble en agua.

Fuente: (Montero, 2003)

De estos suelos, es importante saber que están conformados por un conjunto de niveles llamados horizontes de meteorización, lo cuales tienen características diferentes; la composición cambia según el horizonte y la textura, preservando la estructura original de la roca parental (roca madre); la composición y textura, define el comportamiento de los diferentes horizontes del suelo residual e ingeniería (Montero, 2003). Es por esto que los sistemas de clasificación de perfiles presentan diferentes estados de meteorización, los cuales han sido utilizados por varios investigadores que han adoptado sus propios métodos para describir y caracterizar diferentes zonas compuesta por suelos residuales, tal como se muestra en Tabla 4.

Tabla 4. Perfiles de meteorización de diferentes tipos de roca y diferentes condiciones ambientales

PERFIL ESQUEMÁTICO	LOVE (1951) LITTLE (1961)	VARGAS (1951)	SOWERS (1954, 1963)	CHANDLER (1969)	GEOLOGICAL SOC. ENG. GROUP (1970)	DEERE Y PATTON (1971)
	ROCAS IGNEAS	IGNEAS, BASÁLTICAS Y ARENISCAS	IGNEAS Y METAMÓRFICAS	MARGAS Y LIMOLITAS	ROCAS IGNEAS	IGNEAS Y METAMÓRFICAS
	VI SUELO	SUELO RESIDUAL	ZONA SUPERIOR	V COMPLETAMENTE ALTERADA	VI SUELO RESIDUAL	HORIZONTE IA
	V COMPLETAMENTE ALTERADA	SUELO RESIDUAL JOVEN	ZONA INTERMEDIA	PARCIALMENTE ALTERADA	IV	HORIZONTE IB
	IV ALTAMENTE ALTERADA	CAPAS DE ROCA DESINTEGRADA	ZONA PARCIALMENTE ALTERADA		III	HORIZONTE IC (SAPROLITO)
	III MODERADAMENTE ALTERADA				IV ALTAMENTE ALTERADA	ZONA DE TRANSICIÓN
	II ALGO ALTERADA				III MODERADAMENTE ALTERADA	
	I ROCA SANA	ROCA SANA	ROCA INALTERADA	I ROCA INALTERADA	II DEBILMENTE ALTERADA	IB PARCIALMENTE METEORIZADA
					IA MUY POCO ALTERADA	
					IA ROCA SANA	ROCA SANA

Fuente: (González, 2002)

Conociendo en que consiste este tipo de materiales y la manera en que se forman, es imperioso identificar también sus características generales principales que para Suárez (2009), se encuentran las siguientes:

- Las propiedades de los suelos residuales generalmente son controladas por la fábrica micro o macro, las juntas y demás detalles estructurales, los cuales eran parte integral de la masa de roca original y son heredados por el suelo.
- Sus propiedades especiales son una respuesta a la combinación de los ambientes encontrados en los trópicos, relacionados con el clima, la lluvia, los regímenes de temperatura, la litología del material de roca parental, el movimiento del agua, las condiciones de drenaje, el relieve, la vegetación, la edad y los niveles de meteorización, entre otros factores.
- La meteorización está controlada por el clima regional, el relieve y la litología de la roca y estos factores varían de acuerdo con el sitio. Por tal razón, las propiedades geotécnicas de los suelos tropicales son diferentes para cada país y para cada región dentro de cada sitio.
- La mayoría de deslizamientos de suelos residuales son deslizamientos poco profundos y rápidos del suelo residual sobre el saprolito (Roca algo meteorizada) o la roca, pero cuando los perfiles de meteorización del suelo residual son muy profundos, se pueden presentar también deslizamientos rotacionales.
- Las partículas de suelo residual, con frecuencia, consisten en agregados o cristales de mineral meteorizado que se rompen y se vuelven progresivamente finos, si el suelo es manipulado.

1.1.1.2 Suelos coluviales.

Según lo expuesto por Montero (2003) en uno de los documentos de repositorio “*Meteorización y Suelos*” de la Universidad Nacional de Colombia, los suelos coluviales son depósitos de ladera formados por acción directa de la gravedad con alguna contribución de los agentes de transporte (lluvias, viento, etc.). Proviene de las partes altas de las montañas, desde los macizos de roca, donde se desprenden fragmentos de este tipo de material (tamaños de grandes bolos a gravas) junto con partículas pequeñas de minerales (arenas, limo y arcillas) que se van acumulando progresivamente en la parte media y baja de las laderas.

El origen de estos suelos es local producto de la alteración *in situ* de las rocas y posterior transporte como derrubios de ladera o depósitos de soliflucción; normalmente están asociados a masas inestables cuya composición depende de la roca madre, que posteriormente se convierten en fragmentos angulares que normalmente son de tamaño grueso con poco espesor. Estos materiales suelen tener bajas resistencias sobre todo en la zona de contacto con el sustrato rocoso, y cuando se desarrollan altas presiones intersticiales como consecuencia de las intensas y fuertes lluvias (González, 2002). En la Figura 2 se presenta un ejemplo de depósito coluvial.

Según Suárez (1998) la mayor parte de la superficie en zonas de suelos residuales está cubierta en gran parte por coluviones de diferente espesor; estos materiales tienen una relación muy cercana con los suelos residuales, principalmente como abanicos coluviales en el pie de las laderas y en la literatura técnica se les incluye dentro de los materiales residuales; sin embargo, las características del coluvial dependen del tipo de deslizamiento del que proviene. Este mismo autor expresa que las fallas en estos materiales se dan en dos etapas, iniciando primeramente con un deslizamiento rotacional o traslacional que se presenta por la base del coluvión o formando una línea a través de este, y en la segunda aparece un flujo de la masa removida, dando origen a un escarpe en la corona del movimiento inicial y una longitud larga de flujo hasta la zona de nueva deposición del coluvión; como aproximación de lo descrito se muestra la Figura 3.

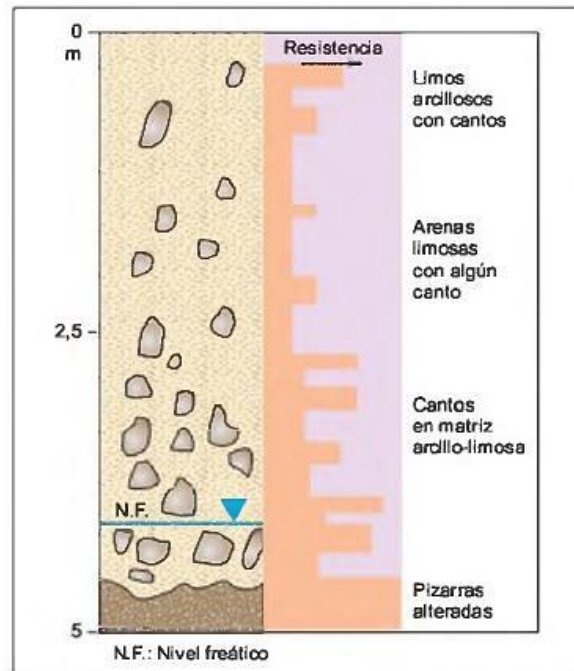


Figura 2. Depósito coluvial. (González, 2002)

Entre los aspectos más importantes que afectan la estabilidad de los coluviones se tienen los señalados en la Tabla 5, así:

Tabla 5. Aspectos más importantes que afectan los suelos coluviales.

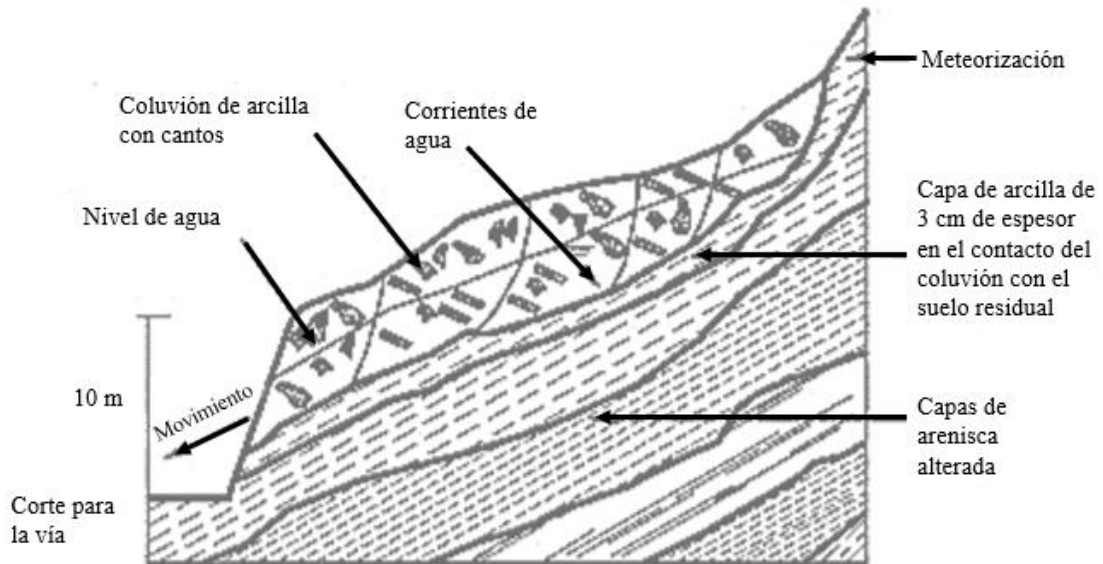
ASPECTOS QUE INFLUYEN EN LA ESTABILIDAD	CARACTERÍSTICAS
Tipo de material de suelo	El tipo, gradación y propiedades de los suelos afectan el comportamiento de los suelos relacionado con sus características hidrológicas y mineralógicas, las cuales pueden controlar la resistencia al cortante. Los coluviones clasto-soportados generalmente, son más estables que los matriz soportados.
Contenido de arcilla humedad y Límite líquido	Los coluviones arcillosos tienden a tener mayor cohesión y al mismo tiempo mayor espesor. Los coluviones arcillosos tienden a fluir al aumentar su contenido de agua, especialmente cuando este se acerca al límite líquido.

ASPECTOS QUE INFLUYEN EN LA ESTABILIDAD	CARACTERÍSTICAS
Permeabilidad	Los coluviones granulares, aunque porosos tienden a ser mucho más permeables y su drenaje, en el caso de lluvias, mucho más fácil, sin embargo, las grietas en los coluviones tienden a canalizar el agua infiltrada hacia ciertas áreas seleccionadas, permitiendo la ocurrencia de deslizamientos relativos, de acuerdo a los patrones de agrietamiento.
Geomorfología	Incluye sus características geológicas, tectónicas, pendiente y forma de los coluviones.
Horizontes estratigráficos	Tienen horizontes estratigráficos que representan cambios en las tasas de depositación.
Superficies de cortante	El movimiento lento de reptación del coluvión produce un alineamiento de los granos de minerales y la creación de numerosas y microscópicas superficies de cortante. Estas superficies reducen en forma importante la resistencia al cortante de los materiales coluviales.
Superficie de Base	La superficie de base del coluvión puede ser una roca que forma un plano de estratificación uniforme o puede ser una superficie irregular con canales internos. Estos canales en la base del coluvión afectan su estabilidad.
Espesor	Los movimientos en estos materiales dependen de su espesor, por lo tanto, grades espesores regularmente producen deslizamientos profundos relativamente lentos, mientras los coluviones de poco espesor producen deslizamientos someros de mayor velocidad.
Hidrología	El agua puede concentrarse en ciertos sitios dentro del coluvión, formando bolsas de agua y la presencia de canales internos en la base del coluvión puede generar corrientes o áreas de acumulación en la base, lo que conlleva a deslizamientos.
Cobertura vegetal	Los coluviones son afectados en forma positiva por el refuerzo de los sistemas de raíces y la pérdida de esta resistencia, cuando se deterioran las raíces debido a la deforestación, puede producir grandes deslizamientos.

ASPECTOS QUE INFLUYEN EN LA ESTABILIDAD	CARACTERÍSTICAS
Sismicidad	Estos materiales tienen un alto potencial de licuefacción, debido a su poca cohesión y a la falta de confinamiento por sus taludes de alta pendiente, por ello la presencia de alta sismicidad, es un factor importante para la ocurrencia de deslizamiento

Fuente: (Suárez, 1998)

A. Falla por el contacto Coluvión-Suelo Residual



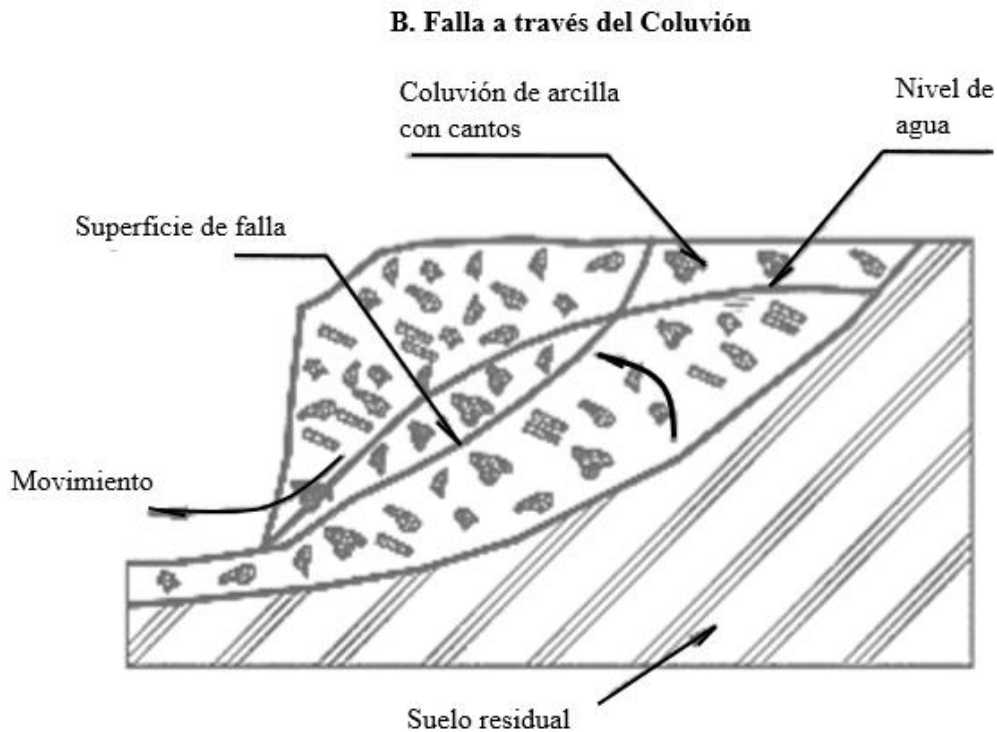


Figura 3. Falla en suelos coluviales. (Suárez, 1998)

1.1.1.3 Propiedades geomecánicas de los suelos y rocas

En el marco de la investigación, para el proceso de modelación numérica es necesario el conocimiento de las constantes asociadas a la deformación, como el módulo de Young (E) y la relación de Poisson (ν), de todos los materiales que conforman el perfil geotécnico de cada caso. En general, cada tipo de material térreo ostenta una gran variabilidad en sus propiedades físicas, condiciones ambientales y comportamiento mecánico, por lo que se requieren de ensayos específicos que midan su comportamiento esfuerzo deformación para la determinación de E y ν , sin embargo, existen rangos entre los cuales estos parámetros elásticos tienen magnitudes características, las cuales han sido estudiadas por muchos investigadores con base en un fuerte soporte bibliográfico y experimental. En la Tabla 6 y en la Tabla 7 se presentan los valores típicos para suelos y rocas, obtenidos de diferentes fuentes bibliográficas.

Tabla 6. Módulo de Young y relación de Poisson para diferentes tipos de suelo

Tipo de suelo	E (MPa)	ν
Arcilla blanda	9	0.40
Arcilla media	33	0.40
Arcilla dura	75	0.40
Limo	11	0.35
Arena suelta	20	0.25
Arena media	40	0.25
Arena densa	65	0.25
Grava suelta	55	0.28
Grava media	90	0.32
Grava densa	150	0.35

Fuente: (Bowles, 1997; Federal Highway Administration, 2006)

Tabla 7. Módulo de Young y relación de Poisson para diferentes tipos de roca.

Tipo de roca	E (MPa)	ν
Gneis	60000	0.22
Lutita	20250	0.33
Conglomerado	45000	0.20
Granodiorita	46000	0.23
Arenisca	29900	0.31

Fuente: (Bowles, 1997; Castillo & Redolledo, 2018; Duncan, 1999; Federal Highway Administration, 2006; Gonzales de Vallejo, 2002)

Teniendo en cuenta que esta información no se registra en todos los casos de estudio, para esta investigación se tomarán los parámetros relacionados en la Tabla 6 y Tabla 7, con el fin de poder efectuar las modelaciones de los distintos escenarios encontrados, empleando el programa seleccionado para el análisis numérico (PHASE2), el cual requiere dentro de sus datos de entrada, valores de Modulo de Young y Relación de Poisson.

1.1.2 Clasificación de los deslizamientos

Para el desarrollo de esta investigación, es importante conocer los diferentes tipos de deslizamientos, por ello es conveniente una revisión bibliográfica general, el cual se hará tomando como principio la clasificación básica manejada por Cruden & Varnes (1996), la cual se fundamenta en el comportamiento mecánico presente en los deslizamientos de tierra, donde se discriminan y nombran los fenómenos más comunes como lo son las caídas, volcamiento, deslizamientos (rotacionales y traslacionales), propagación lateral, flujos y deslizamientos compuestos.

No obstante, como información general es importante tener en cuenta lo expuesto por Hungr y otros autores (2013), quienes manifiestan que se debe plantear un cambio sustancial frente a los términos utilizados por Varnes (1978), en tanto dicha clasificación es demasiado estática y no refleja en realidad la dinámica presente en los deslizamientos; esto significa que la recurrente clasificación dada por este autor; debe dar paso a una actualización que refleje de mejor forma cada una de las etapas presentes en un determinado deslizamiento de tierra.

En virtud de este análisis, Hungr y otros autores (2013) proponen que la tipología de deslizamientos debe desarrollarse basado en un criterio de flexibilidad, de forma que pueda no solo reflejar los fenómenos actuales sino, también, que pueda ser respetuoso con la clasificación que ya se tenía establecida, luego lo que se busca, no es una nueva clasificación, sino comprender que esta se encuentra mediada a manejarse de manera versátil y ajustada a condiciones reales encontradas. A partir de estos criterios, estos autores sugieren que con base en la clasificación de Varnes, se subclasifiquen 32 tipos específicos de deslizamientos, los cuales se encuentran enmarcados en dos tipos de materiales como lo son la roca y suelo, discriminándose puntualmente en la Tabla 8.

Tabla 8. Síntesis de la propuesta de la actualización de la clasificación de deslizamientos de Varnes desarrollada por Hungr, Leroueil y Picarelli.

TIPO DE MOVIMIENTO	ROCA	SUELO
<i>Caída</i>	1. Caída de roca / hielo	2. Caída de roca / detritos / limo
<i>Volcamiento</i>	3. Caída del bloque de roca 4. Derrumbe de la roca	5. Sedimentación de grava / arena / limo
<i>Deslizamiento</i>	6. Deslizamiento giratorio de roca 7. Deslizamiento plano de roca 8. Deslizamiento en cuña de roca 9. Deslizamiento compuesto de roca 10. Deslizamiento irregular de roca	11. Deslizamiento rotacional de arcilla / limo 12. Deslizamiento planar arcilla / limo 13. Deslizamiento de grava / arena / detritos 14. Deslizamiento compuesto arcilla / limo
<i>Propagación</i>	15. Extensión de la roca	16. Propagación de licuefacción de arena / limo 17. Propagación de arcilla sensible
<i>Flujo</i>	18. Avalancha de roca / hielo	19. Flujo seco de arena / limo / detritos 20. Propagación de flujo de arena / limo / detritos 21. Propagación de arcilla sensible 22. Flujo de detritos 23. Flujo de lodo 24. Inundación de detritos 25. Avalancha de detritos 26. Flujo de tierra 27. Flujo de turba

TIPO DE MOVIMIENTO	ROCA	SUELO
<i>Deformación de la pendiente</i>	28. Deformación de ladera de montaña 29. Deformación de ladera rocosa	30. Deformación de la pendiente del suelo 31. Arrastramiento de suelo 32. Soliflucción

Fuente: (Hungar, Leroueil, & Picarelli, 2014)

Una manera de clasificar los movimientos en masa, es de acuerdo con los factores que los causan; la definición de estos factores fundamentan el proceso de zonificación de la susceptibilidad, lo que hace indispensable su entendimiento. Diferentes investigaciones han representado los factores que condicionan el terreno a potenciales deslizamientos, asociados principalmente a las características intrínsecas del terreno, así como los elementos que detonan el movimiento como lo son la lluvia y los sismos. Varnes (1978) discrimina cuatro grupos de causas, asociadas al terreno, a la morfología, a eventos físicos como lluvias intensas y/o prolongadas, erupciones volcánicas y sismos, y por último las causas de origen antropológico, como excavaciones, sobrecargas, deforestación y vibraciones artificiales entre otros.

Por su parte, Cruden y Varnes (1996) establecieron tres grupos de procesos que potencialmente provocan deslizamientos, procesos que incrementan el esfuerzo cortante, características que contribuyen a una baja resistencia y procesos que reducen la resistencia al corte. Esta agrupación permite entender los factores condicionantes y detonantes mediante su comportamiento mecánico y respuesta a acciones externas, dándole una visión geotécnica al análisis de la susceptibilidad. En la Tabla 9 se relacionan algunos de los procesos descritos por Cruden y Varnes (1996).

Tabla 9. Clasificación de procesos que inducen deslizamiento.

CATEGORÍA	ALGUNOS EJEMPLOS
Procesos que incrementan el esfuerzo cortante	<p>Eliminación del soporte: Erosión en la pata del talud por sectores de río, cortes a laderas por obras de construcción o excavaciones.</p> <p>Sobrecarga: Infiltración de agua, crecimiento de vegetación, acumulación de materiales provenientes de otros deslizamientos o actividad volcánica. Rellenos o estructuras.</p> <p>Esfuerzos transitorios: Sismos, explosiones, actividades de construcción, paso de vehículos.</p>
Características que contribuyen a una baja resistencia	<p>Tipos de materiales: blandos, saturados con agua, orgánicos o que contienen arcillas, sensitivos y/o meteorizados. Fabrica.</p> <p>Discontinuidades: fallas, foliación, juntas, fisuras.</p> <p>Secuencias sedimentarias.</p>
Procesos que reducen la resistencia al corte	<p>Meteorización: Reacciones físicas y químicas, pérdida de cohesión por hidratación de minerales arcillosos, fisuración por erosión o excavaciones, desintegración por cambios en la temperatura.</p>

Fuente: (Cruden y Varnes , 1996).

La anterior información busca contextualizar conceptos generales de los tipos de deslizamientos, en aras de interiorizarlos y relacionarlos con el objeto de la investigación. A continuación, se describen los tipos de movimientos más comunes y se relacionan los principales factores que condicionan su ocurrencia.

1.1.2.1 Caídas

Este movimiento abrupto de partículas o de una masa de material terreo, se presenta por lo general en pendientes muy inclinadas y se asocia a materiales de resistencia relativamente alta, que contienen planos de fallas o fracturas por las que se puede iniciar el desprendimiento. Es usual encontrar caídas en suelos sobreconsolidados de alta resistencia y en rocas sedimentarias con

intercalaciones de materiales débiles según lo dispuesto por Alzate (2005), sin embargo, “los factores de mayor influencia en la caída de rocas y suelos, son la gravedad, la meteorización y la presión de agua intersticial” (D. M. Cruden & Varnes, 1996). En cuanto al detonante sísmico, Tiwari y Ajmer (2017) afirman que los movimientos de tipo caída inducidos por sismo, están frecuentemente asociados a sismos de gran magnitud.

Otras de las causas mencionadas por Suárez (1998) son la acción del viento, la escorrentía, acción antrópica, erosión diferencial, raíces de árboles, nacimientos de agua, vibraciones por terremotos o maquinaria y descomposición del suelo.

1.1.2.2 Volcamiento

Este proceso normalmente se da en formaciones rocosas, producto de la acción de la gravedad, fuerzas actuantes generadas por unidades adyacentes, existencia de agua en las juntas, expansión y movimientos sísmicos; dependiendo de cualidades geométricas y estructura geológica, la inclinación puede o no terminar en caídas o derrumbes. (Suárez, 1998).

Por su parte, Baczynski, Sheppard, Smith, Simbina, & Sakail (2008), indican que el factor condicionante más importante en los volcamientos, está relacionado con la geología estructural, la geometría de bloques en un macizo y la ubicación de su centro de gravedad. Por ejemplo, un bloque ubicado en la pata de un talud suficientemente suelto puede desencadenar fácilmente un volcamiento.

Calderón et al. (2007), indican que existen dos tipos de volcamiento entre los que se encuentra el **vuelco de bloques** que involucra roca relativamente competente o sana, donde la falla ocurre por pérdida de la estabilidad y rotación de uno o varios bloques a partir de un punto en la base, está controlado por una orientación específica de discontinuidades y normalmente está asociado con velocidades altas. Por otro lado se encuentra el **vuelco por flexión** que involucra rocas más frágiles con alto grado de diaclasamiento, donde la falla ocurre por el doblamiento de columnas de rocas delgadas que producen movimientos lentos y graduales.

1.1.2.3 Deslizamiento

De acuerdo con Cruden & Varnes (1996) el termino deslizamiento que generaliza los diferentes tipos de movimientos en masa, hace referencia estrictamente al caso en el que material deslizante se separa, por una zona debil bien definida, de un material subyacente más estable.

Suárez (1998), afirma que este tipo de eventos pueden ser de una o varias masas de suelo semi-independientes y progresivas, lo que quiere decir que no se inician simultáneamente a lo largo de toda la superficie de falla, la cual se origina por la desestabilización de volúmenes de tierra por efectos de cortes, rellenos, deforestación, entre otros.

Se establecen dos grupos de deslizamientos, el rotacional que define una superficie de falla curva y el traslacional en el que la superficie de falla es planar.

1.1.2.3.1 Deslizamiento rotacional.

Generalmente se da en materiales residuales homogéneos, naturales o artificiales, rocas ígneas y metamórficas, influenciadas por las discontinuidades, juntas y planos de estratificación, donde la resistencia al corte aumenta con la profundidad. De acuerdo con Coraminas (2004) y el resultado de la investigación de otros autores como Melelli, Faralli, Gasparri, & Piccioni (2017), los deslizamientos rotacionales son característicos de suelos cohesivos y en macizos rocosos altamente fracturados con ausencia de vegetación, cuya morfología favorece a la meteorización.

1.1.2.3.2 Deslizamiento traslacional.

Este deslizamiento se caracteriza porque la masa de suelo se desplaza hacia afuera o hacia abajo a lo largo de una superficie de falla normalmente plana; son controlados por superficies de debilidad tales como fallas, juntas, fracturas, planos de estratificación y zonas de cambio de estados de meteorización que generan cambios en la resistencia al corte de los materiales, es usual que el plano de contacto con la roca sea un plano de falla. Factores como la meteorización y el fracturamiento también pueden condicionar la ocurrencia de movimientos traslacionales, en tanto la

zona de mayor debilidad tenga una geometría plana. En cuanto a las pendientes de los taludes estas pueden ser suaves.

1.1.2.3.3 Propagación lateral.

Considerando la descripción de García (1998) y Suárez (1998), el movimiento presenta una falla progresiva que se extiende lateralmente sin una superficie basal de corte o zona de flujo plástico bien definida. Pueden ocurrir en masas de roca sobre suelos plásticos como arcillas y limos sensitivos, en sedimentos glaciales y marinos, y no son comunes en suelos residuales tropicales.

Por su parte Galvis (2016), indica que la propagación lateral hace parte de los movimientos en masa que se caracterizan por incluir varias tipologías de movimiento en un mismo deslizamiento, de ahí que se les llame también como movimientos compuestos. El desplazamiento lateral se presenta en taludes de baja pendiente; esta propagación lateral puede ser generada por fracturas de corte y tensión sobre roca o sobre suelo plástico.

La propagación lateral se presenta por el esparcimiento rápido de un conjunto de bloques de suelo que, a su vez, se encuentra flotando en una capa de suelo con características granulares y saturados, es decir suelto; esto se produce como consecuencia de terremotos o de licuefacción espontánea: “Este tipo de propagación ocurre como resultado de la licuefacción espontánea o sísmica, donde el material licuable forma solo una pequeña parte del volumen inestable, el resto del material se rompe en bloques más o menos intactos, que "flotan" en una capa móvil situada en profundidad” (Hungr, Leroueil, & Picarelli, 2014). En la investigación hecha por Tiwari y Ajmer (2017) se encontraron movimientos de este tipo detonados por sismos con magnitudes inferiores a 5 por lo que la identificación del potencial de licuación es un factor importante en la definición de susceptibilidad.

1.1.2.4 Flujos.

Según García (1998), este tipo de movimiento se puede presentar en roca o en suelo; para el caso de las rocas incluye deformación continua en el espacio con una fluencia lenta superficial y

profunda, abarca movimientos diferenciales lentos en extremo y no acelerados entre unidades relativamente intactas, los cuales pueden:

- Ocurrir a lo largo de muchas superficies de corte que en apariencia no están conectadas.
- Llevar plegamiento, flexión y abombamiento.
- Ser similares a los fluidos viscosos en la distribución de velocidades.

1.1.2.4.1 Flujo de suelos.

En suelos secos, pueden presentar movimientos lentos que dependen de la humedad y la pendiente donde se producen, por el contrario, en zonas de alta montaña y desérticas se generan flujos muy secos con altas velocidades; normalmente la falla es muy rápida y el flujo desciende en forma de ríos de suelo, con una superficie de deslizamiento que no está bien definida lo que comúnmente también se le conoce como flujo de lodos.

De estos últimos podría decirse que hacen parte de los flujos de suelo, y los diferencia su grado de fluidez o viscosidad que está relacionada con altas humedades en suelos muy finos; se distinguen porque poseen dos zonas morfológicamente muy marcadas que presentan una zona de canal de flujo y otra que es la zona de acumulación; pueden comenzar con deslizamientos de rotación o traslación.

1.1.2.4.2 Flujo de rocas.

Se caracterizan por deformaciones que se distribuyen a lo largo de muchas fracturas que pueden ser grandes o pequeñas, normalmente este tipo de movimientos se dan en zonas tropicales de alta montaña y de poca vegetación, presentan perfiles de meteorización poco profundos donde las fallas normalmente se dan por cambios de esfuerzos y lixiviación generada por la infiltración de agua en las primeras horas de una lluvia fuerte; su ocurrencia se da en pendientes mayores que 45°, normalmente en rocas ígneas y metamórficas muy fracturadas, donde predominan velocidades rápidas a muy rápidas de flujos ligeramente húmedos.

1.1.2.4.3 Flujo de detritos.

Normalmente se identifican por estar formados por materiales con alto porcentaje de materiales gruesos que terminan en residuos, donde la masa que se desliza se divide en pequeños fragmentos que se mueven o desplazan lentamente, y en caso de ser rápido y progresivo se les llama avalanchas. Estos movimientos pueden ser activados por lluvias que saturan el material y generan pérdida de succión, así mismo por el desarrollo de fuerzas internas producto de aguas subterráneas.

1.1.2.4.4 Deslizamientos complejos.

Estos movimientos se caracterizan por tener una combinación de varios de los tipos de deslizamiento descritos en anteriores párrafos, y se puede presentar por la ocurrencia de cualquiera de los movimientos mencionados, el cual se va convirtiendo en otro a medida que progresa el evento de desintegración. Se originan a partir de 3 o más deslizamientos superficiales que confluyen en un mismo canal, depositando gran cantidad de material el cual se mezcla con el agua proveniente de las laderas y de los cauces menores, licuándose hasta convertirse en flujos” (Fernández, 2003).

1.1.3 Métodos de análisis en geotecnia

La estabilidad de taludes se debe entender como la búsqueda de la altura crítica que puede tener una pendiente o la carga de colapso aplicada sobre una porción del talud, en unas características particulares de un suelo determinado, el cual requiere para evaluación, la realización de un estudio donde se caracterice y conozcan factores como la resistencia del suelo, perfil y condiciones de filtración y agua subterránea; lo que permitirá seleccionar una superficie de deslizamiento con el fin de calcular su factor de seguridad, coadyuvando a determinar la superficie de falla crítica (Aguilar & Zuñiga, 2015).

Para solucionar problemas geotécnicos o de taludes, existen diferentes métodos de análisis, estos pueden ser agrupados en tres clases generales, entre los que se encuentran los métodos de solución exacta (métodos analíticos), simples y numéricos; las soluciones analíticas pueden ser obtenidas únicamente para problemas geotécnicos simples donde el suelo se considera como un

material elástico. En la práctica, debido al comportamiento no-lineal del suelo y a la complejidad de los problemas de ingeniería, este procedimiento está difícilmente disponible, lo que ha llevado a introducir simplificaciones en el problema para tratarlos adecuadamente; por su parte, estos pueden ser implementados ignorando algunos requerimientos de la solución completa, como es el caso de los métodos de equilibrio límite y análisis límite (Bojorque, 2011, pág. 2).

Como apoyo en la implementación de estos métodos, existen herramientas que facilitan el análisis de los casos en estudio. Es así como en la presente investigación, se utilizan programas que facilitan (SLIDE y PHASE2) el análisis de estabilidad y deformidad, basados teóricamente en el método de equilibrio límite y elementos finitos respectivamente, los cuales tienen unas características particulares para su implementación que se sustentan en criterios de diferentes autores, tal como se indica en la Tabla 10.

Tabla 10. Métodos de análisis de estabilidad de taludes.

MÉTODO	SUPERFICIES DE FALLA	EQUILIBRIO	CARACTERÍSTICAS
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	De fuerzas	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	De momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero, reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobre determinada, debido a que no establecen condiciones de equilibrio para una dovela.
Janbú Simplificado	Cualquier forma de superficie de	De fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La

MÉTODO	SUPERFICIES DE FALLA	EQUILIBRIO	CARACTERÍSTICAS
(Janbú 1968)	falla.		solución es sobre determinada y no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección F_0 para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Asume que las fuerzas entre partículas están inclinadas a un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas. Esta simplificación deja una serie de incógnitas y no satisface el equilibrio de momentos. Se considera el más preciso de los métodos de equilibrio de fuerzas.
Spencer (1967)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo con una función arbitraria.

MÉTODO	SUPERFICIES DE FALLA	EQUILIBRIO	CARACTERÍSTICAS
Sarma (1973)	Cualquier forma de la superficie de falla	Momentos y fuerzas	Asume que las magnitudes de las fuerzas verticales siguen un sistema predeterminado. Utiliza el método de las dovelas para calcular la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla. Esto permite desarrollar una relación entre el coeficiente sísmico y el factor de seguridad. El factor de seguridad estático corresponde al caso de cero coeficientes sísmicos. Satisface todas las condiciones de equilibrio; sin embargo, la superficie de falla correspondiente es muy diferente a la determinada utilizando otros procedimientos más convencionales.
Elementos finitos	Cualquier forma de la superficie de falla	Analiza esfuerzos y deformaciones.	Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos, pero no se obtiene un factor de seguridad.
Espiral logarítmica	Espiral logarítmica	Momentos y fuerzas.	Existen diferentes métodos con diversas condiciones de equilibrio.

Fuente: (Escobar & Duque, 2016)

Para el análisis de estabilidad, en su mayoría serán usados los métodos de Bishop y Janbu, los cuales se describen a continuación, según lo expuesto por Escobar & Duque (2016).

1.1.3.1 Método Bishop

Bishop (1955) presentó un método utilizando Dovelas y teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas entre estas. La solución de Bishop es relativamente compleja y por esta razón se utiliza una versión simplificada de su método que está dada por la expresión:

$$FS = \sum \frac{[c' * b + (W - u * b) * \text{Tan}\phi' / ma]}{\sum W * \text{sen } \alpha} \quad (1)$$

Dónde:

$$ma = \left(1 + \frac{\text{Tan } \alpha * \text{Tan}\phi}{FS}\right) \quad (2)$$

b = Ancho 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 = $\gamma_w * h_w$

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

1.1.3.2 Método de Janbu

El método de Janbu tiene como principal consideración que las fuerzas que actúan sobre las dovelas son horizontales, sin tomar en cuenta las fuerzas cortantes. En este método la superficie de falla no es necesariamente circular.

En la solución no se satisface el equilibrio de momento para la última tajada. La solución simplificada es muy conocida y se puede escribir:

$$FS = \frac{f_0 \sum \left\{ [C' * b + (W - u * b) * \tan\phi] * \frac{\sec^2 \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha * \tan \phi}{FS}} \right\}}{\sum (W * \tan \alpha)} \quad (3)$$

1.1.3.3 Método de elementos finitos

Este método fue introducido por Clough y Woodward (1967) y permite resolver muchas de las deficiencias de los métodos de equilibrio límite; consiste básicamente en dividir la masa de suelo en unidades discretas que se llaman elementos finitos, los cuales se interconectan en sus nodos y en bordes predefinidos, generando una malla como se muestra en la Figura 4. El método típicamente utilizado es el de la formulación de desplazamientos que muestra los resultados en forma de esfuerzos y desplazamientos a los puntos nodales; la condición de falla conseguida es la de un fenómeno progresivo en donde no todos los elementos fallan simultáneamente.

Existen varios programas de análisis de estabilidad de taludes que utilizan métodos numéricos entre los que se pueden encontrar algunos como PLAXIS, FLAC, UDEC, PHASE2, entre otros. Estos que deben cumplir los siguientes requerimientos o características:

- Deben mantener el equilibrio de esfuerzos en cada punto, el cual se realiza muchas veces empleando la teoría elástica para describir los esfuerzos y deformaciones. Para predecir el nivel de esfuerzos se requiere conocer la relación esfuerzo - deformación.
- Las condiciones de esfuerzos de frontera deben satisfacerse

Existe dificultad en la mayoría de los casos reales para definir la relación esfuerzo - deformación, teniendo en cuenta lo difícil que es describir los depósitos de suelos naturales en términos de esfuerzo - deformación. También existe otra limitante y es el poco conocimiento de los esfuerzos reales in situ que se requieren para incorporar en el modelo, es así como el análisis planar o en dos direcciones asume cero esfuerzo o cero deformación en las superficies laterales del modelo, por lo tanto para que se simulen las condiciones de campo se requiere que existan esas condiciones (Escobar & Duque, 2016).

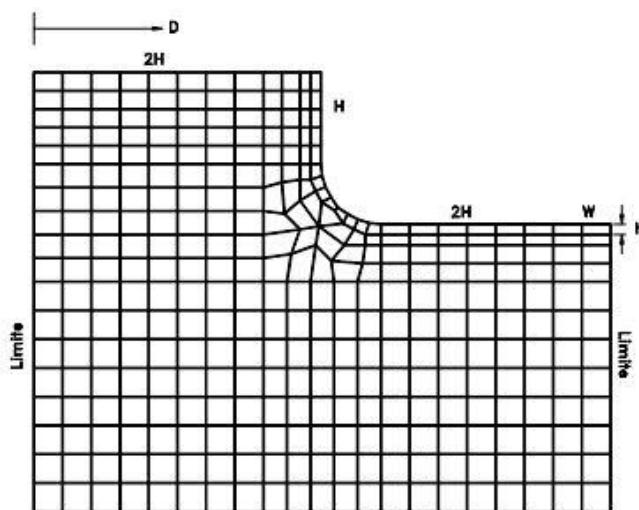


Figura 4. Malla típica para el análisis de un talud vertical por elementos finitos según (Ashford y Sitar 1994). (Escobar & Duque, 2016).

La malla mostrada anteriormente, contiene elementos de tamaño uniforme con anchos (w) y alturas (h); estas características de los elementos, influye en forma importante sobre los resultados obtenidos, por lo tanto, es importante resaltar que entre más pequeños sean los elementos, se obtienen mayores niveles de esfuerzos de tensión en la cresta del talud.

Con la contextualización general de alguno de los métodos de análisis en geotecnia, en este trabajo se usarán los softwares para la evaluación de los distintos casos de deslizamientos encontrados, uno de ellos es el SLIDE (V6.0) que permite el análisis de la estabilidad de taludes en dos dimensiones, el cual usa como método de solución el equilibrio límite para así calcular la estabilidad; este programa se aplica en obras civiles, y permite valorar un gran número de problemáticas geotécnicas, además incluye un análisis de agua subterránea por elementos finitos en estado estacionario, integrando análisis de sensibilidad, probabilidad y un análisis retrospectivo. La interfaz gráfica basada en CAD ofrece una amplia gama de modelos y opciones de interpretación de los datos, que permite un análisis rápido y exhaustivo y con mucha exactitud.

Por otro lado, PHASE 2 (V8.0) que también maneja las dos dimensiones, usa los elementos finitos elasto – plástico y utiliza el método de la reducción de la resistencia al corte. Esta opción es totalmente automatizada, usando intrínsecamente métodos o teorías como Mohr Coulomb ó Hoek-Brown, los parámetros de análisis se pueden personalizar si es necesario y cuenta con un análisis de

esfuerzos en excavaciones de roca y suelos. Este programa se puede usar para una amplia gama de problemas de ingeniería e incluye una función de filtración de aguas subterráneas en el análisis de la estabilidad de taludes; también permite a los usuarios importar archivos de SLIDE para análisis de estabilidad de taludes en PHASE 2, facilitando la comparación de equilibrio límite y resultados de elementos finitos.

1.2. Marco de Antecedentes

1.2.1. Susceptibilidad y amenaza por deslizamientos

De acuerdo con Fell et al. (2008) y SGC (2017) la susceptibilidad del terreno a deslizamientos es el resultado de una evaluación cuantitativa o cualitativa que permite determinar la probabilidad de ocurrencia de eventos de movimiento de materiales térreos, la cual depende del análisis de factores intrínsecos que condicionan el deslizamiento. Según Brabb (1984) la susceptibilidad está asociada a la probabilidad de que en un área determinada se presente un deslizamiento.

Por lo general la susceptibilidad a deslizamientos está asociada a dos suposiciones, la primera es que áreas que hayan experimentado deslizamientos en el pasado son propensas a la experimentación de nuevos deslizamientos, y la segunda sugiere que áreas que tienen características topográficas, geológicas y geomorfológicas similares a las de una en la que se registran deslizamientos, tienen una alta probabilidad de experimentar deslizamientos. (SAG, 2007)

Por otro lado, el término de amenaza hace referencia a la condición potencial de daño, es así como Varnes (1984) la define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino en un periodo de tiempo específico y en un área dada. Como es definido por el SGC (2017), la amenaza es un evento físico capaz de dañar parcial o totalmente la integridad de seres humanos, bienes o recursos naturales.

Por su parte, Suárez (1998) manifiesta que el nivel de amenaza se puede identificar a través de la determinación de unos Factores de Seguridad, que se hallan a partir de la identificación de propiedades de suelo obtenidas de una investigación geológica – geotécnica. El nivel de amenaza en función del Factor de Seguridad se ilustra en la Figura 5.

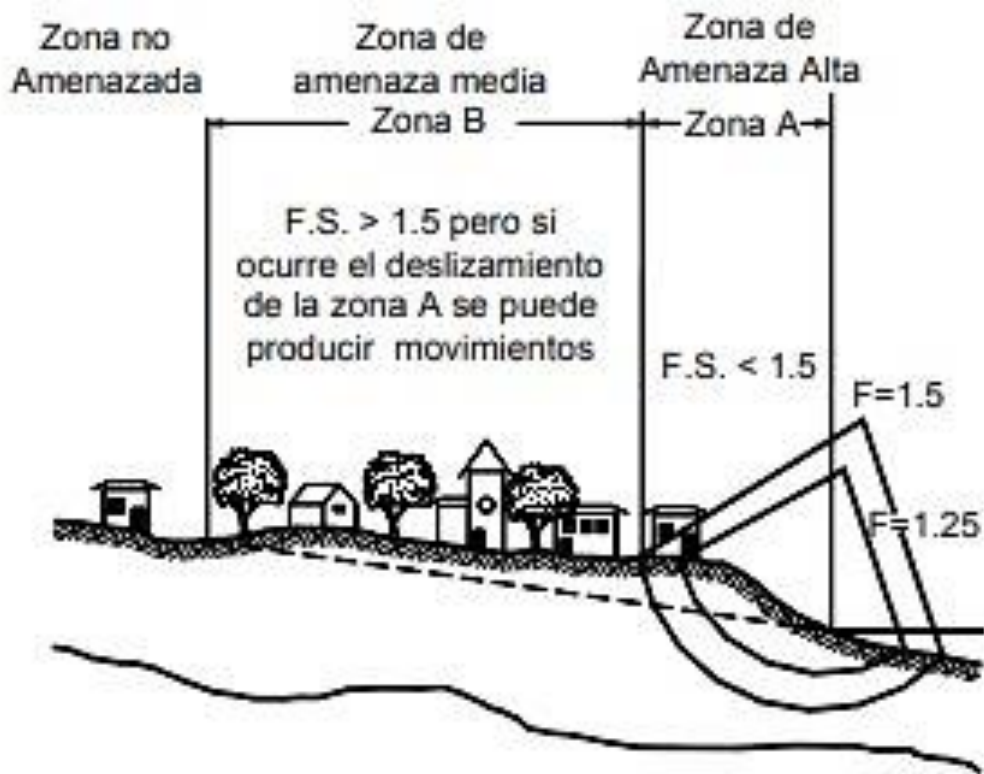


Figura 5. Zonificación de amenaza a los deslizamientos (Suárez, 1998)

La diferencia entre susceptibilidad y amenaza, de acuerdo con lo descrito por Jones (2004), radica en la intervención del factor humano, el primer concepto se refiere a la probabilidad de que un deslizamiento ocurra, mientras que el segundo es la probabilidad de que dicho deslizamiento tenga consecuencias negativas desde el punto de vista humano.

La susceptibilidad se enfoca en la física del evento, considera los factores condicionantes y categoriza el área de estudio a partir de elementos geométricos, geoambientales y de comportamiento mecánico. Por su parte, el análisis de amenaza involucra la capacidad del evento de producir daño, definiendo entre otros la magnitud e intensidad del movimiento en escala temporal y espacial. Esto significa que es necesario el uso de un estudio de susceptibilidad como un insumo básico para la definición de la amenaza y el riesgo; sin embargo, este puede ser utilizado como producto final para el análisis de usos del suelo e impacto ambiental. (Corominas et al., 2014).

1.2.2. Enfoques metodológicos para el análisis de susceptibilidad

En la medida que el desarrollo de la ingeniería ha permitido el entendimiento de los diferentes factores que desencadenan movimientos en masa, es posible la identificación de zonas susceptibles a deslizamientos y en consecuencia la mitigación de la amenaza (Varnes, 1984). Por lo tanto, la definición de la susceptibilidad establece una herramienta indispensable en la toma de decisiones asociadas a la gestión del riesgo, aportando directamente a la seguridad social y económica que se relacionan con actividades de desarrollo como la planeación territorial.

Debido a la complejidad del medio, las condiciones ambientales y sus diferentes combinaciones, existe un espectro muy amplio de tipos de deslizamientos, por lo que diferentes metodologías han sido propuestas para el análisis de la susceptibilidad (Guzzetti et al., 2005). Sin embargo, es común el uso de información de elementos que describen los procesos involucrados en la inestabilidad de taludes y factores desencadenantes tales como el relieve (pendientes), geología, geomorfología, propiedades geotécnicas, lluvia y actividad sísmica, además de un inventario de deslizamientos del sitio de interés.

De acuerdo con la revisión de los factores ambientales que inciden en la susceptibilidad a deslizamiento realizada por Van Westen, Castellanos, & Kuriakose (2008), los parámetros geotécnicos como la distribución granulométrica, la cohesión, el ángulo de fricción y los demás parámetros propios del estudio de estabilidad de taludes, son utilizados únicamente en análisis a escala detallada y la información geológica suele considerarse más eficiente.

Según Guzzetti, Carrara, Cardinali, & Reichenbach (1999), el análisis de susceptibilidad a deslizamientos puede realizarse mediante la aplicación de métodos cualitativos que describen la susceptibilidad de manera subjetiva según la experiencia de quien realiza el análisis. Por otro lado, existen los métodos cuantitativos definidos a partir del análisis de datos, estimaciones numéricas de probabilidades y uso de modelos físicos; estos diferentes enfoques aplican diferentes sistemas de calificación y asignación de pesos, que dependen del área de afectación y de los factores que condicionan los deslizamientos. Por lo tanto, estos pesos y clasificaciones juegan un papel vital en la preparación de mapas de susceptibilidad utilizando cualquiera de los enfoques. (Gupta et al., 2018)

Los métodos de análisis de análisis de susceptibilidad pueden discriminarse en tres grandes grupos, métodos heurísticos, métodos estadísticos y métodos determinísticos (Corominas et al., 2014), los cuales se describen a continuación.

1.2.2.1. Métodos Heurísticos

Este método implementa un análisis por parte de profesionales en el área, quienes con su experiencia hacen estudios conceptuales de deslizamientos ocurridos en una zona determinada a partir de trabajos de campo, donde se requiere para su implementación dividir el terreno en subáreas con características similares en aspectos de relieve, geología, geomorfología y geotecnia. Posteriormente, se asignan subjetivamente unos pesos a factores que se estiman son primordiales en el evento, para así determinar unos grados de susceptibilidad relativa.

Un tipo de enfoque asociado al método heurístico en la zonificación de susceptibilidad es el mapeo directo, como indica Jones (2004), existen tres principales tipos, los inventarios de deslizamientos, el análisis geomorfológico en campo y la combinación cualitativa de factores clave en los deslizamientos. En este último, un peso ponderado es asignado a cada uno de los factores identificados, y la suma de estos pesos permite que el evento sea clasificado en diferentes rangos de susceptibilidad.

Como parte de la investigación de Nicholson & Hencher (1997) en la que evalúan el potencial de deterioro de macizos rocosos, fue definida una clasificación de susceptibilidad del macizo mediante la asignación de un peso a diferentes factores, como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Pesos para evaluar la susceptibilidad de rocas a los deslizamientos.

FACTOR	CARACTERÍSTICAS	PESO
Espaciamiento de las discontinuidades	>2 m	2
	600 mm - 2 m	8
	200 - 600 mm	16

	60 - 200 mm	28
	<60 mm	35
Abertura de las discontinuidades en milímetros	Cerrada – 0.1 mm	1
	0.1 - 0.5 mm	3
	0.5 - 1.0 mm	7
	1.0 - 5.0 mm	13
	>5.0 mm	15
Resistencia de la roca intacta MPa	>200	2
	100-200	5
	50-100	10
	12.5-50	18
	5-12.5	27
	<5	35
Meteorización	Roca sana	1
	Roca algo meteorizada	5
	Roca moderadamente meteorizada	10
	Roca altamente meteorizada	14
	Roca completamente meteorizada	15
Valor Total de Susceptibilidad		
Clase	Valor	Descripción de la Susceptibilidad
1	0-20	Muy baja
2	20-40	Baja
3	40-60	Moderada

4	60-80	Alta
5	>80	Muy Alta

Fuente: (Nicholson & Hencher, 1997)

De acuerdo con el manual para la zonificación de áreas susceptibles a deslizamientos inducidos por lluvia de la Sociedad Geotécnica Japonesa, plantea una propuesta para la evaluación de susceptibilidad, donde se incluye la asignación de los pesos que se relacionan en la Tabla 12.

Tabla 12. Valoración de factores para la evaluación de susceptibilidad a los deslizamientos debidos a lluvias.

Factor	Característica	Peso
Altura del talud	≥ 10 m.	7
	<10 m.	3
Inclinación del talud	$\geq 45^\circ$	1
	< 45°	0
Salientes topográficas (overhangs)	Presentes	3
	Ausentes	0
Espesor de suelo superficial	≥ 0.5 m.	1
	<0.5 m.	0
Nacimientos de agua	Presentes	1
	Ausentes	0
Fallas alrededor del área	Presentes	3
	Ausentes	0

Fuente: (Asian Technical Committee on Geotechnology for Natural Hazards in ISSMFE, 1997)

Ruff & Czurda (2008) evaluaron la susceptibilidad al deslizamiento de los Alpes orientales de Austria con un enfoque heurístico, describiendo la susceptibilidad con valores de 0 (baja susceptibilidad) a 1 (alta susceptibilidad). Se consideraron 7 factores de análisis relacionados con la inclinación del talud, estructura geológica (distancia a la falla), erosión, vegetación y clase geotécnica (tipo de material y origen), a cada factor se asignó un valor de acuerdo con las condiciones de la zona de estudio, a rocas blandas homogéneas se les asigna una alta susceptibilidad

y a zonas ubicadas a más de 100 m de un sistema de fallas tectónicas se le asigna una baja susceptibilidad (I_1). Estos factores fueron divididos en tres grupos, morfología, geología y ambiental, y fueron asignados pesos para cada factor (I_2) y para cada grupo (I_3). La susceptibilidad fue calculada como la sumatoria de los productos de los índices de cada factor. En la Tabla 13 se presentan los valores de cada índice.

Los resultados se combinan con inventarios y a partir del uso de fotografías aéreas o imágenes satelitales se generan mapas de susceptibilidad. De acuerdo con el análisis de los investigadores la adición de factores a la metodología es muy sencilla.

Tabla 13. Índices para el análisis de susceptibilidad.

Factor I_1	Grupo	Índice de factor I_2	Índice de grupo I_3
Inclinación del talud	Morfología	0.6	0.4
Aspecto del talud		0.4	
Clase geotécnica	Geología	0.5	0.5
		0.3	
Fallas		0.2	
Erosión	Ambiental	0.6	0.1
Vegetación		0.4	

Fuente: (Ruff & Czurda, 2008).

Diferentes metodologías que utilizan el método heurístico han sido diseñadas para la definición de la susceptibilidad mediante la asignación empírica de pesos, dos propuestas adicionales son expuestas en la Tabla 14 y la Tabla 15. Pese a la facilidad con que las metodologías pueden ser aplicadas, su selección debe ser cuidadosa y deben considerarse los efectos de las condiciones locales.

Tabla 14. Valores relativos para la ocurrencia de deslizamientos.

Factor	Calificación	Ejemplo	
Formación Geológica	0 a 5 dependiendo de la calidad de la formación	Un coluvión matriz soportado	Calificación = 5
		Una arcillolita susceptible	Calificación = 4
		Un granito	Calificación = 3
		Una arenisca competente	Calificación = 0
Estructura	0 a 3 dependiendo del rumbo, buzamiento y resistencia al cortante de las discontinuidades	Estructura favorable a los deslizamientos	Calificación = 3
		Estructura algo favorable	Calificación = 2
		Estructura No favorable	Calificación = 0
Grado de meteorización	0 a 3	Muy meteorizado	Calificación = 3
		Roca sana	Calificación = 0
Fracturación	0 a 3	Muy fracturada	Calificación = 3
		Sin fracturas importantes	Calificación = 0
Nivel freático	0 a 3	Superficial	Calificación = 5
		No hay nivel freático	Calificación = 0
Susceptibilidad Geológica - Geotécnica	Suma de todas las calificaciones		

Fuente: (Suárez, 1998)

Tabla 15. Pesos de los diferentes factores para tener en cuenta en la evaluación de amenazas por deslizamientos.

FACTORES GEOLÓGICOS				
Factor	Descripción	Categoría	Peso	Observaciones

Litología	Tipo de Material	Cuarcita y Caliza	0.2	Muy meteorizada, multiplicar por 4.
		Granito y Gabro	0.3	Algo meteorizado, multiplicar por 3.
		Neis	0.4	Poco meteorizada, multiplicar por 2.
		Areniscas	1.0	Muy meteorizada, multiplicar por 1.5 Algo meteorizada, multiplicar por 1.25 Poco meteorizada, multiplicar por 1.1
		Pizarra y Filita	1.2	
		Areniscas con algo de lutitas	1.3	
		Esquisto	1.3	
		Lutitas no arcillosas	1.8	
		Lutitas arcillosas	2.0	
		Materiales aluviales antiguos muy bien consolidados	0.8	
		Suelos arcillosos	1.0	
		Suelos arenosos, blandos	1.4	
		Coluviones granulares o clásto-soportados	1.5	
		Coluviones arcillosos antiguos	3.0	
		Coluviones arcillosos jóvenes	4.0	
Estructura	Relación de paralelismo entre el talud y las discontinuidades	Más de 30° 21° a 30° 11° a 20° 6° a 10° Menos de 5°	0.20 0.25 0.30 0.40	Se mide el ángulo que forma la dirección de las discontinuidades más representativas.

			0.50	
Relación entre el buzamiento de las discontinuidades y la inclinación del talud	Más de 10° 0° a 10° 0° 0° a -10° Más de -10°	0.3 0.5 0.7 0.8 1.0		Si el buzamiento es mayor que el del talud el ángulo es positivo y si es menor que el del talud, el ángulo es negativo.
Buzamiento de la discontinuidad	Menos de 15° 16° a 25° 26° a 35° 36° a 45° Más de 45°	0.20 0.25 0.30 0.40 0.50		
Ángulo entre el rumbo de las discontinuidades y el rumbo de la dirección del talud	Más de 30° 10° a 20° Menos de 5°	0.2 0.3 0.5		
Distancia a una falla geológica importante	0 a 200 metros 200 a 500 metros 500 metros a 1 Km 1 a 2 Km 2 a 5 Km	0.8 0.6 0.3 0.2 0.1		Falla geológica importante es la que presenta evidencias de fracturamiento de la roca a una distancia de más de 100 metros.
Espesor de la capa del suelo	Menos de 5 metros 6 a 10 metros 11 a 15 metros 16 a 20 metros Más de 20 metros	0.65 0.85 1.30 2.00 1.20		

FACTORES TOPOGRÁFICOS Y AMBIENTALES

Factor	Categoría	peso	Observación
Morfometría (Pendiente de los taludes)	Más de 45° 36° a 45° 26° a 35° 16° a 25° Menos de 15°	2.0 1.7 1.2 0.8 0.5	Pendiente promedio en longitudes de 20 metros o más
Relieve relativo	5 a 20 m 20 a 50 m	0.1 0.2	

Diferencia de altura entre la divisoria de aguas y el valle	50 a 100 metros	0.3	
	101 a 300 metros	0.6	
	Más de 300 metros	1.0	
Uso de la Tierra	Área Urbana	2.00	
	Cultivos anuales	2.00	
	Vegetación intensa	0.80	
	Vegetación moderada	1.20	
	Vegetación escasa	1.50	
	Terrenos áridos	2.00	
Aguas subterráneas	Inundable	1.0	
	Pantanosos	0.8	
	Muy húmedo	0.5	
	Húmedo	0.2	
	Seco	0.0	
Máxima precipitación diaria	Más de 150 mm	1.0	
	100 a 150 mm	0.8	
	50 a 100 mm	0.6	
	20 a 50 mm	0.2	
	0 a 20 mm	0.0	
Máxima precipitación horaria	Más de 40 mm	1.0	
	30 a 40 mm	0.8	
	20 a 30 mm	0.6	
	10 a 20 mm	0.4	
	5 a 10 mm	0.2	
	0 a 5 mm	0.0	
Aceleración sísmica en la roca de acuerdo con los códigos nacionales	Más de 0.3 g	2.0	
	0.2g a 0.3g	1.0	
	0.1g a 0.2g	0.5	
La sumatoria de todos los pesos permite obtener una apreciación de la amenaza relativa. Por este procedimiento, no puede determinarse la amenaza absoluta			

Fuente: (Suárez, 1998)

Dentro de las ventajas y desventajas que tiene la implementación de este enfoque, se presentan en la Tabla 16 descrita por Van Westen et al. (2008) y Suárez (1998).

Tabla 16. Ventajas y desventajas del Método Heurístico.

Ventajas	Desventajas
<p>Permite la aplicación de experiencia, conocimiento e intuición.</p> <p>No hay lugar a arbitrariedad en la priorización de factores</p> <p>El método acepta fácilmente la incorporación de consideraciones subjetivas</p> <p>La estructura está claramente definida.</p> <p>Es sencillo, rápido y de bajo costo</p>	<p>Es difícil establecer una única metodología para la asignación de pesos a los diferentes factores</p> <p>Alto nivel de susceptibilidad</p> <p>Existe gran incertidumbre</p> <p>Generalizaciones inaceptables debido a información de campo insuficiente</p>

Fuente: (Van Westen et al.,2008; Suárez,1998)

Tal como se describe en los anteriores cuadros, las metodologías que usan el método heurístico para el cálculo de la susceptibilidad, no registran una asignación de pesos en la estimación ponderable para los factores geotécnicos, limitándose a contemplar tipo de material; razón que permite viabilizar lo planteado en el problema y justificación de este trabajo, que busca ver el grado de influencia de algunos parámetros geotécnicos en la evaluación de esta problemática, e intenta encontrar un rango entre los parámetros geotécnicos analizados, para que sean incluidos en la metodología.

1.2.2.2.Métodos Estadísticos:

En estos métodos se realizan cálculos de densidades y cantidades de deslizamientos que ocupan una determinada área de estudio con características geomorfológicas homogéneas, buscando encontrar rangos de parámetros que influyen directamente en la estabilidad. Su procedimiento consiste en sobreponer mapas de unidades homogéneas con los mapas de inventarios de deslizamiento para calcular las densidades descritas inicialmente en apoyo de SIG¹, para ello suponen que las áreas donde haya habido esta serie de procesos pueden presentar una alta susceptibilidad a la presencia de nuevos deslizamientos parecidos a los predecesores.

¹ Sistema de Información Geográfica

Entre los parámetros usados para la sistematización de susceptibilidad y/o amenaza se encuentra la litología, uso de la tierra, pendientes, isoyetas de lluvias, entre otras. Al igual que los métodos heurísticos, en este también se estiman unos pesos de los parámetros que se contemplan para su determinación, los cuales dependen de la experiencia de profesionales expertos en el tema, que hacen un análisis estadístico para cada factor, que después correlacionan con el inventario de deslizamiento de la zona de estudio; de igual forma hacen una distribución de los tamaños y frecuencias de deslizamientos, encontrando los factores más influyentes en la ocurrencia del evento.

Los métodos estadísticos pueden clasificarse de acuerdo con dos principales enfoques el análisis bivariado y el análisis multivariado. Algunos de los métodos estadísticos bivariados son el análisis de relación de frecuencia, modelo de valor de información (IVM¹), modelo de pesos de evidencia (WoE²), modelo de superposición de pesos, entre otros. Como parte de los métodos multivariados, la zonificación de la susceptibilidad incluye análisis con modelos de regresión logística, análisis discriminante, modelos de regresión múltiple análisis condicional y redes neuronales artificiales (Pardeshi et al., 2013).

En una investigación reciente realizada por Krivoguz & Bepalova (2020) fue aplicado el enfoque estadístico de pesos de evidencia para el análisis de susceptibilidad a deslizamientos de la península Kerch; en general el método implica la superposición de los casos históricos en el área de estudio con los factores condicionantes, esta intersección define la ausencia o presencia del factor en las áreas inestables, y sirve para calcular la probabilidad de ocurrencia de los deslizamientos.

Krivoguz & Bepalova (2020) describen la susceptibilidad en su forma matemática como la sumatoria de la contribución de los factores influyentes, los pesos son asignados de $-\infty$ a 0 en la medida que los factores restringen el deslizamiento y de 0 a ∞ a los factores que contribuyen al movimiento.

Con el apoyo de SIG la zona de estudio se discrimina en celdas, las cuales pueden caracterizarse teniendo en cuenta la presencia o ausencia de deslizamiento. La probabilidad de que se presente el evento $P\{D\}$, se calcula con la siguiente expresión:

$$P\{D\} = \frac{N\{D\}}{N\{T\}} \quad (4)$$

¹ Information Value Model

² Weight of Evidence

Donde,

$N\{D\}$: Número de celdas en las que se presenta el evento

$N\{T\}$: Número total de celdas.

Considerando los factores de influencia definidos para la zona de análisis, para cada factor se define un predictor binario con un valor para cada celda. Si cierto número de deslizamientos están dentro de las celdas de determinado factor se calcula la probabilidad de que el evento se de en presencia o ausencia del factor, mediante las siguientes expresiones:

$$P\{D|B\} = \frac{P\{D \cap B\}}{P\{B\}} \quad (5)$$

$$P\{D|\bar{B}\} = \frac{P\{D \cap \bar{B}\}}{P\{\bar{B}\}} \quad (6)$$

Donde,

B : Predictor binario en presencia del factor influyente

\bar{B} : Predictor binario en ausencia del factor influyente

El peso de cada factor se calcula de acuerdo con la probabilidad de ocurrencia del factor en función de la existencia o ausencia del evento.

$$W^+ = \ln \frac{P\{B|D\}}{P\{B|\bar{D}\}} \quad (7)$$

$$W^- = \ln \frac{P\{\bar{B}|D\}}{P\{\bar{B}|\bar{D}\}} \quad (8)$$

Donde,

W^+ : Peso del factor en presencia del evento

W^- : Peso del factor en ausencia del evento

La susceptibilidad se define mediante un índice de susceptibilidad de deslizamientos (LSI), el cual se calcula como se muestra en la siguiente expresión, en donde O_f es un coeficiente de peso de los deslizamientos presentes en el área de estudio definido por el autor.

$$LSI = exp(\sum W^+ + \ln O_f) \quad (9)$$

Como insumo para el estudio se realizó la clasificación morfológica y morfométrica y el inventario de eventos. Los factores a los cuales fueron asignados los pesos calculados con la metodología descrita anteriormente fueron la pendiente, índices de vegetación, actividad sísmica, erosión, potencial de escorrentía, distancia a cuerpos de agua, litología, distancia a carreteras y tipo de suelo. Existen otros métodos para la zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos que requieren de un análisis multivariado, como la lógica difusa, la red neuronal artificial, el análisis discriminante, el mapeo directo, el análisis de regresión y el enfoque neuro-difuso (Gupta et al., 2018). Dentro de las ventajas y desventajas en la implementación de esta metodología se pueden incluir las que se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17. Ventajas y desventajas de los Métodos Estadísticos.

Método Estadístico	
Ventajas	Desventajas
Da una medida cuantitativa de la densidad de los deslizamientos.	Asume densidad de deslizamientos continua en el espacio.
Se pueden comparar, directamente las diversas regiones.	No permite estimar el comportamiento futuro.
Los mapas se pueden cambiar de escala fácilmente.	Se requiere gran cantidad de información histórica o de un evento específico.

Método Estadístico	
Ventajas	Desventajas
Genera una muy buena combinación entre los parámetros escogidos por los expertos y el análisis espacial cuantitativo.	Requiere de inventarios completos de deslizamientos.
Da una idea objetiva de la susceptibilidad.	Asume la independencia de los parámetros de entrada.

Fuente: (Suárez, 1998)

1.2.2.3. Métodos Determinísticos:

En estos métodos se busca determinar el grado de amenaza con relación al Factor de Seguridad haciendo uso del análisis de estabilidad de taludes que considere los aspectos geotécnicos e hidrológicos del área de estudio. Su procedimiento consiste en realizar modelos de análisis (Equilibrio límite, talud infinito, Bishop, Fellenius entre otros) con una información específica del perfil que se desea analizar, incluyendo unas propiedades de resistencia de los materiales presentes, niveles freáticos y unos periodos de retorno.

De acuerdo con Van Westen y Terlien (1996) la principal desventaja del método es la espacialización de los parámetros. Las propiedades mecánicas de suelo se determinan a una escala muy detallada, requieren investigación de campo y ensayos de laboratorio y el medio es por lo general muy variable, por ende, el proceso de zonificación se considera complejo.

Adicionalmente, las condiciones hidrológicas en cualquier zona de estudio son dinámicas incluso en términos temporales; se requieren parámetros hidráulicos como la intensidad y duración de lluvia y conductividad hidráulica entre otros. La complejidad y variación de las condiciones hace necesaria la determinación de simplificaciones que permitan la zonificación; Según Cho (2009) es conveniente asumir flujo transitorio.

Por lo anterior, diferentes autores consideran en las metodologías determinísticas condiciones de contorno muy específicas y un nivel importante en las limitaciones.

Según Corominas et al., (2014) los métodos determinísticos o los métodos basados en la física se dividen en tres tipos, métodos de análisis por equilibrio límite con apoyo en SIG, métodos con análisis cinemáticos en dos y tres dimensiones y métodos de numeración numérica.

Uno de los métodos determinísticos más reconocidos es el desarrollado por Montgomery y Dietrich (1994), que considera varias simplificaciones en el tipo de material, flujo y vegetación, pero ha generado buenos resultados mediante la combinación de información geográfica y el método del talud infinito (Sidle y Ochiai, 2006; Aristizábal, 2013).

En la Tabla 18 se presentan las ventajas y desventajas asociadas a la implementación de este método, de acuerdo con Suárez (1998).

Tabla 18. Ventajas y desventajas de los Métodos Determinísticos.

Método Estadístico	
Ventajas	Desventajas
Se basa en los modelos físicos soportados.	Requiere precisión de los parámetros de entrada.
Permite analizar varios escenarios.	Modelos predictivos difíciles de evaluar.
Da información de susceptibilidad y de amenaza.	Modelos complejos difíciles de evaluar en escalas pequeñas.

Fuente: (Suárez, 1998)

1.2.2.4. Lineamientos de referencia para el análisis de susceptibilidad y zonificación de amenaza

Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000

En Colombia, el gobierno nacional por medio del Decreto 1807 de 2014, reglamenta la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan disposiciones especiales que son de total obligatoriedad para los entes territoriales, endilgando al Servicio Geológico Colombiano (SGC) la responsabilidad de liderar la parte técnica de esta gestión del riesgo; para ello este organismo ha elaborado y dispuesto de una Guía para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25.000, donde se detallan lineamientos metodológicos para realizar este tipo de estudios en todas las zonas de relieve escarpado, montañoso y ondulado con pendientes del terreno mayor a cinco (5) grados, más los taludes marginales de cauce, así como,

las zonas planas que pueden recibir los efectos de los movimientos en masa (SGC, 2017). Esta guía sirve como aporte al conocimiento integral del territorio, contribuyendo con la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y el desarrollo sostenible; dentro de su método de trabajo se manejan tres etapas del proceso, a través del cual se obtiene el producto final de zonificación tal como se ilustra y describe en la Figura 6, así:

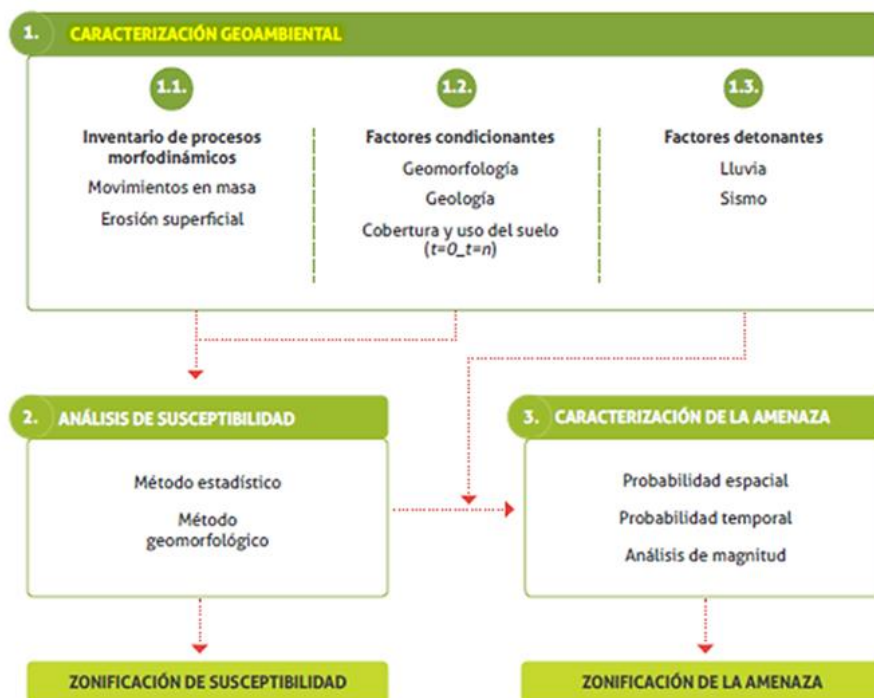


Figura 6. Marco de referencia para el análisis de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25:000. (SGC, 2017)

Para entender un poco cada uno de los componentes expuestos en el marco de referencia de análisis de amenaza utilizado en esta metodología, a continuación se describen cada una de las etapas.

Caracterización geoambiental: Esta etapa comprende el levantamiento y consecución de la información temática relacionada con inventario de procesos morfodinámicos, factores condicionantes y factores detonantes, los datos de entrada requeridos para obtener la zonificación de susceptibilidad y/o amenaza (geología, geomorfología, cobertura de la tierra y uso del suelo, clima

y sismicidad), adicionalmente, como parte de la caracterización geomecánica se menciona la definición del tipo de material y su resistencia mecánica. De igual forma en esta fase se hace una interpretación visual de imágenes y trabajo de campo que permite conocer las particularidades de la zona de estudio, contribuyendo a la estimación de hipótesis para los mecanismos identificados en relación con los felementos que generan los deslizamientos.

Los factores condicionantes utilizados van encaminados a la inclusión de aspectos de geología, geomorfología, cobertura de la tierra y uso del suelo, que establecen la tendencia del terreno a la ocurrencia de movimientos en masa, considerándose intrínsecos o inherentes al área de estudio, dado que prácticamente no varían en el tiempo. (SGC, 2017).

Haciendo una verificación de los componentes de interés para la presente investigación, a continuación, en la Tabla 19, se verifican los elementos utilizados para la evaluación de susceptibilidad y/o amenaza que utiliza esta guía:

Tabla 19. Factores y temáticas para la caracterización geoambiental del área de estudio y zonificación de amenaza por movimientos en masa propuestos en esta metodología.

FACTOR/TEMÁTICA	CAPAS Y TIPOS DE DATOS
INVENTARIO DE PROCESOS MORFODINÁMICOS	Inventario de movimientos en masa y erosión Actividad de los movimientos en masa Distribución
GEOMORFOLOGÍA	Pendiente Curvatura Morfogénesis
UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES	Tipos de roca Meteorización Discontinuidades Aspectos estructurales

	Fallas Tipos de suelo Espesor del suelo Propiedades geotécnicas Propiedades hidrológicas
COBERTURA Y USO DEL SUELO	Cobertura de la tierra Uso del suelo actual Cambio de la cobertura de la tierra
DETONANTES	Lluvia Sismo

Fuente: (SGC, 2017)

Después de recopilar datos, analizarlos, validarlos en campo y obtener resultados; la forma de incorporar estos factores, es integrando todos los elementos con sus atributos al Sistema de Información Geográfica con el que se apoya o sugiere la guía, donde toda la información encontrada se incluye en la herramienta por medio de capas con características particulares que posteriormente se cruzan a partir de procedimientos propios que utilizan los SIG, en los que se efectúan representaciones de factores condicionantes y detonantes más usuales de la zona en estudio los cuales se correlacionan o comparan con datos estadísticos en el que se hayan evidenciado los diferentes deslizamientos que más incidieron en el mismo. Dependiendo los tipos de movimientos que se identifiquen y a partir de la disponibilidad de información, se define la mayor o menor importancia de los factores determinantes y su correspondiente elección.

Tal como se puede verificar en la Tabla 19, los aspectos más cercanos a la parte geotécnica para la evaluación de la susceptibilidad y/o amenaza, son categorizados en las Unidades Geológicas Superficiales, que para escalas más detalladas (> 1:25.000) se considera necesaria la elaboración de mapas geológicos donde se muestre información sobre la litología de los materiales presentes (rocas o suelos), su origen, disposición estructural, características físicas y mecánicas, características

hidrológicas e hidrogeológicas, entre otros (SGC, 2017). Estos aspectos se pueden detallar en la Tabla 20, así:

Tabla 20. Unidades Geológicas Superficiales (UGS) según su origen.

TIPO DE MATERIAL	ORIGEN	TIPO DE UGS	
Roca	Derivadas de roca in situ	<ul style="list-style-type: none"> - Roca dura (Calidad de macizo buena y muy buena). - Roca intermedia (Calidad de macizo regular). - Roca blanda (Calidad de macizo mala y muy mala). 	
Suelo	Derivadas de roca In situ	-Suelo residual: Horizontes IV (saprolito grueso), V (saprolito 253fino) y VI.	
	Suelo Transportado	Depósitos volcaniclásticos primarios	-Lahar, avalancha de escombros.
		Depósitos aluviales	<ul style="list-style-type: none"> -Aluviones recientes y de cauce activo. -Llanura aluvial. -Abanicos o conos aluviales. -Terrazas aluviales. -Depósitos fluviotorrenciales.
		Depósitos lacustres y paludales	<ul style="list-style-type: none"> -Suelos fluvio lacustres. -Suelos Paludales.
		Depósitos costeros	-Deltas, Barras, Playas, etc.

TIPO DE MATERIAL	ORIGEN	TIPO DE UGS	
		Depósitos eólicos	-Dunas y Médanos. -Loess.
		Depósitos glaciares	-Coluvial. -Talus, derrubios de pendiente. Flujos (de lodo, tierra y de escombros)
		Depósitos antrópicos	-Llenos de basuras -Llenos de escombros -Llenos mixtos

Fuente: (SGC, 2017)

Para la elaboración de un mapa de Unidades Geológicas de Suelo, en esta guía se proponen cuatro etapas: (1) la recopilación y análisis de información temática secundaria, (2) la interpretación de la información temática y de imágenes de sensores remotos con la cual se obtiene el mapa de UGS preliminar; (3) la validación de campo, (4) la integración de la información y la presentación de los productos finales, entre ellos el mapa de UGS, perfiles geológicos y columnas estratigráficas tipo. Las propiedades geotécnicas incluidas en los mapas de UGS se obtienen en la etapa 1, mediante la recopilación y análisis de estudios de suelos y se validan en la etapa 3 a través de la toma de datos y muestras, la exploración geotécnica que se requiera se define de acuerdo con el criterio del experto, los resultados se incluyen como atributos de los polígonos correspondientes a cada UGS como parte de un SIG.

Análisis de susceptibilidad: Para este procedimiento, la guía en mención propone la aplicación de un método estadístico bivariado, el cual se combina con el conocimiento de la zona de estudio a partir de subunidades geomorfológicas y criterios de campo. Se estima que el inventario de procesos morfodinámicos es el insumo más importante para establecer la relación entre un factor o combinación de factores condicionantes y la posibilidad de ocurrencia de movimientos en masa tal como se propone en esta metodología (SGC, 2017,p.20); analizar el inventario de procesos

morfodinámicos debe permitir plantear hipótesis sobre las zonas de mayor o menor inestabilidad (susceptibles), las cuales serán comprobadas y validadas a partir de estadística y criterio de expertos. Como limitaciones que tendría esta técnica para determinar la susceptibilidad a partir de las características de los materiales, es el caso en el que no existiera información de deslizamiento, no se podría emplear el método, limitando de esta forma su implementación.

El insumo para la zonificación de la susceptibilidad es la caracterización geomecánica, que incluye los factores asociados a la morfometría, las unidades geológicas superficiales, la cobertura y uso del suelo y el inventario de procesos. Para la aplicación de la metodología se requiere de una plataforma SIG que contenga el modelo de elevación digital y todos los factores condicionantes seleccionados. Para el caso de las UGS, estas corresponden a polígonos cuya tabla de atributos contiene la información relacionada en la Tabla 19 entre las que se encuentran las propiedades geotécnicas.

Posteriormente, la metodología propone la aplicación del método estadístico bivariado de pesos de evidencia, similar al explicado en el numeral 1.2.2.2. Para cada píxel, se asigna el peso por categoría a cada factor condicionante y la suma de los pesos de todos los factores corresponde al índice de susceptibilidad (LSI) de deslizamiento, es decir que para cada píxel el LSI corresponde, por ejemplo, a la sumatoria del peso asignado al tipo de UGS, la unidad geomorfológica, la cobertura y el uso de suelo presente en ese píxel. Cabe resaltar que los pesos asignados están relacionados con la densidad de deslizamientos según el inventario de eventos.

Después del análisis estadístico se realiza una curva de éxito y se validan los resultados y las categorías obtenidas de acuerdo con los movimientos inventariados. En la Figura 7 se presenta la metodología general para el cálculo de la susceptibilidad.

Es importante destacar que las categorías de susceptibilidad en esta metodología están basadas en el número o densidad de deslizamientos por área, el cual es representada cartográficamente en cuatro clases entre las que se encuentra la baja, media, alta y muy alta (SGC, 2017,p.20). De igual forma se resalta que la susceptibilidad incluye información relacionada con los tipos y subtipos de movimiento en masa en la zona de estudio, así como las características o factores condicionantes que determinan la mayor o menor posibilidad de ocurrencia de cada tipo de movimiento en las categorías de susceptibilidad respectiva, tal como se muestra en la Tabla 21.

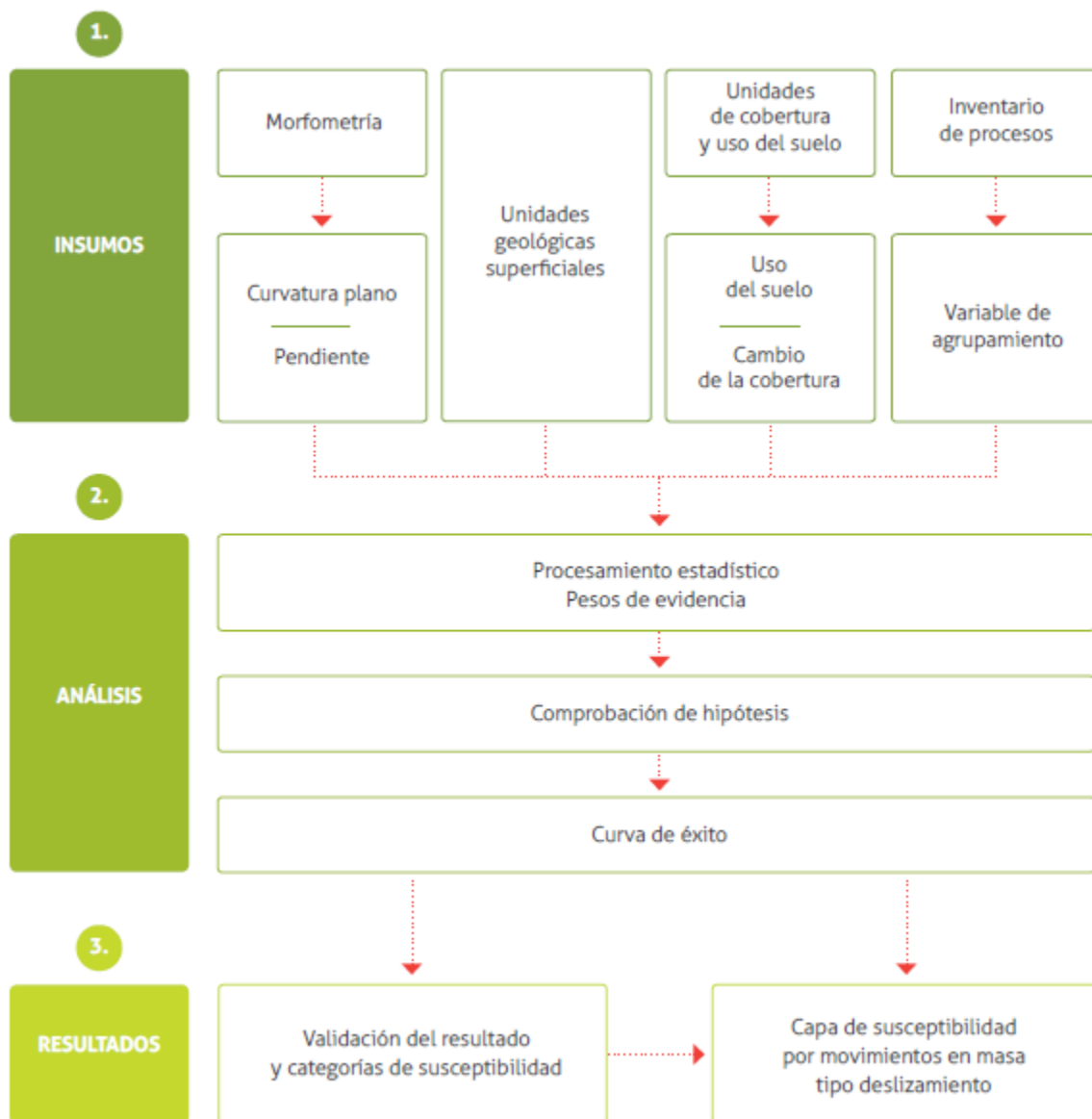


Figura 7. Modelo conceptual para el cálculo de susceptibilidad. (SGC, 2017)

Tabla 21. Contenido de la leyenda del mapa de susceptibilidad.

CATEGORÍA	TIPOS Y SUBTIPOS DE MOVIMIENTO	CARACTERÍSTICAS GEOAMBIENTALES – FACTORES CONDICIONANTES
MUY ALTA	Movimientos en masa activos del inventario de procesos morfodinámicos	

CATEGORÍA	TIPOS Y SUBTIPOS DE MOVIMIENTO	CARACTERÍSTICAS GEOAMBIENTALES – FACTORES CONDICIONANTES
ALTA	Deslizamientos Caídas Flujos	UGS - Subunidades geomorfológicas - Cobertura de la tierra y Uso del suelo
MEDIA	Deslizamientos Caídas Flujos	UGS-Subunidades geomorfológicas - Cobertura de la tierra y Uso del suelo
BAJA	UGS - Subunidades geomorfológicas - Cobertura de la tierra y Uso del suelo	

Fuente: (SGC, 2017)

De acuerdo con lo anterior, se infiere que los factores geotécnicos se consideran únicamente para la caracterización de las Unidades Geológicas Superficiales (UGS) y que parámetros geotécnicos como el ángulo de fricción, la cohesión, límites de consistencia, entre otros, no se incluyen de forma en la metodología general de análisis de susceptibilidad, la cual se muestra en la Figura 7, pese a su papel determinante en la ocurrencia del evento, como se demuestra más adelante en el análisis de los casos en estudio.

Caracterización de la amenaza: El análisis de amenaza que se trata en esta metodología requiere la integración de los diferentes tipos de proceso que pueden ocurrir en la zona de estudio, así como sus características particulares, relación con los factores condicionantes, detonantes, probabilidades espaciales temporales y de magnitud. Esto puede ser manejado desde diferentes enfoques y metodologías, que a su vez dependen de los objetivos, la escala de trabajo y la calidad de los datos disponibles. De acuerdo con la Guía Metodológica del SGC (2017), en escalas medias como la 1:25.000, la amenaza se caracteriza a partir del tipo de movimiento en masa (deslizamiento, flujo y caída), la probabilidad espacial relacionada con la susceptibilidad, la probabilidad temporal expresada normalmente en términos de frecuencia, periodo de retorno o probabilidad de excedencia.

Con relación a lo anterior, la metodología para determinar la amenaza depende fundamentalmente de la disponibilidad de inventarios de movimientos en masa basados en eventos en los que se pueda establecer una relación directa entre la frecuencia de ocurrencia de un tipo de movimiento en masa y un evento detonante, que además permitirá realizar análisis magnitud-frecuencia. Es así como se hace necesario elaborar estos inventarios, de manera casi que inmediata después de la ocurrencia del evento detonante, pero desafortunadamente en la mayoría de las regiones no se cuenta con este tipo de información, lo cual limita la ejecución de este procedimiento.

Algunos ejemplos de esta metodología se pueden verificar a continuación:

Zonificación geomecánica y de amenaza por movimientos en masa del municipio de Popayán – Cauca

La zonificación geomecánica y de amenaza por movimientos en masa realizada en el año 2015 para la ciudad de Popayán, incluye el análisis de susceptibilidad a deslizamientos para dos escalas de análisis, 1:25.000 en la zona rural y 1:5.000 en la zona urbana.

Para el análisis a escala 1:25.000, al igual que en la Guía Metodológica del SGC se seleccionó un modelo estadístico bivariado que permite definir la probabilidad de un evento de deslizamiento en un área determinada a partir de la relación entre el inventario y los factores condicionantes. Dentro de los factores condicionantes se consideraron las UGS, las unidades geomorfológicas, la cobertura del suelo, la actividad tectónica y variables geométricas como la pendiente y la curvatura.

Para este estudio cada una de las UGS fueron clasificadas de acuerdo con su origen y las características intrínsecas del suelo, entre las que se encuentran la litología, color, tamaño, textura, dureza, consistencia, resistencia, humedad, compacidad y permeabilidad. La resistencia de cada unidad fue determinada mediante su valor frente a la compresión simple.

Para el análisis de susceptibilidad se aplicó el método de pesos de evidencia recomendado en la guía metodológica del SGC, asignando pesos a cada una de las categorías de los factores condicionantes, para el caso de las UGS se calculó un peso a cada una de las unidades definidas y

con apoyo en sistemas de información geográfica, se obtuvo el índice de susceptibilidad de deslizamiento (como se explicó en la metodología del SGC) sumando este peso y los pesos de los demás factores, por cada una de las unidades de análisis correspondientes a píxeles del mapa de zonificación. Se observa que para este análisis las propiedades geotécnicas de los materiales fueron obtenidas de forma general solo mediante ensayos de compresión simple o la determinación de consistencia en campo, y su uso se fundamenta en la caracterización de las UGS, sin un análisis profundo o requerimiento de ensayos adicionales, esto radica en la escala de trabajo.

Para el análisis a escala 1:5.000, en pro de la definición de la susceptibilidad del área de estudio al deslizamiento, se realizó un mapa de zonificación geomecánica con insumo básico en un modelo geológico geotécnico basado en una caracterización obtenida de exploración del subsuelo y la ejecución de ensayos de laboratorio, estos últimos planeados a partir del resultado de la etapa de recopilación de información.

La exploración incluyó la ejecución de perforaciones mecánicas de recuperación continua de 20 m de profundidad, apique de 1.5 m de profundidad de donde se extrajeron muestras de tipo bloque, ensayos in situ de tipo CPT y DPSH con profundidades de entre 5m y 20m, down-hole y líneas de refracción sísmica.

En el análisis de amenaza se consideró un enfoque determinístico y probabilístico, aplicando el método de equilibrio límite y por ende cálculo del factor de seguridad para cada celda dentro del mapa de zonificación asumiendo talud infinito y realizando un análisis de probabilidad de los parámetros geotécnicos con simulaciones de Monte Carlo. Como resultado se obtiene la distribución espacial del FS en el área de estudio. La probabilidad de falla se obtiene calculando la probabilidad de que el FS sea menor o igual que 1 dada la lluvia y el sismo en un escenario determinado por la probabilidad de que la lluvia y/o el sismo se presenten. De acuerdo con la probabilidad obtenida en cada celda, se categorizó la amenaza en alta, media y baja.

La metodología aplicada en escala detallada sugiere la determinación de parámetros geotécnicos en toda el área de estudio mediante un plan de investigación del subsuelo detallado, y con base en las UGS establecidas para la escala 1:25.000 se discriminaron las zonas geomecánicas considerando estratificación, límites de consistencia, número de golpes, resistencia al corte no drenado y ángulo de fricción.

Zonificación geomecánica y amenaza por movimientos en masa en el Municipio de Soacha – Cundinamarca escala 1:25.000

Para la zonificación de susceptibilidad por movimiento en masa del municipio de Soacha, se establecieron insumos relacionados con la geología de la zona de estudio, la geomorfología, cobertura, hidrología e inventario. La zonificación mecánica a escala 1:25.000 fue posible debido a la cantidad de información geotécnica recopilada de estudios de referencia y la ejecución de un plan de investigación geotécnica compuesto por 31 sondeos mecánicos con profundidades entre 10m, 23m y ensayos de laboratorio.

Con base en la información obtenida se clasificó cada una de las UGS, asignando datos básicos de clasificación como límites de consistencia, pesos unitarios y análisis granulométrico, además de mediadas de resistencia y deformación, obteniéndose resistencia a la compresión simple, resistencia al corte no drenado, cohesión y ángulo de fricción.

En el análisis de amenaza se calculó el Factor de Seguridad en cada píxel de 25m definidos en el mapa de zonificación programando en ArcGIS la función asociada a talud infinito (en consistencia con el tipo de falla traslacional más común en el inventario) con un criterio de falla de Mohr Coulomb. La amenaza se categorizó de acuerdo con el Factor de Seguridad obtenido para diferentes escenarios de sismo y condición de saturación.

Guía para la zonificación de susceptibilidad, amenaza y riesgo de la Sociedad Australiana de Geomecánica

La Sociedad Australiana de Geomecánica (SAG) publicó en 2007 la guía para la zonificación de susceptibilidad amenaza y riesgo para la planeación del uso del suelo. Las directrices establecidas para la definición de la susceptibilidad se incorporan a la guía como parte del marco diseñado por esta Sociedad para la gestión del riesgo por deslizamientos.

Como punto de partida, la guía establece los principios para la selección del nivel de detalle y la escala de la zonificación. De acuerdo con las recomendaciones que se emiten, la zonificación de la susceptibilidad no es recomendada a escala regional con fines reglamentarios, ni para

zonificación específica de sitio con fines informativos. En la Tabla 22 se relacionan las demás escalas recomendadas.

Tabla 22. Escalas y nivel de la zonificación según el propósito.

Propósito	Tipo de zonificación				Nivel de la zonificación			Escala del mapa de zonificación
	Inventario	Susceptibilidad	Amenaza	Riesgo	Preliminar	Intermedio	Avanzado	
Zonificación regional								
Informativo	X	X			X			1:25.000 a 1:250.000
De consulta	X	X	(X)		X	(X)		
Normativo	NO SE RECOMIENDA							
Zonificación local								
Informativo	X	X	X	(X)	X	(X)		1:5.000 a 1:25.000
De consulta	(X)	X	X	X	X	X	X	
Normativo		(X)	X	(X)		X	X	
Zonificación específica de sitio								
Informativo	NO SE RECOMIENDA							> 1:5.000 Típico 1:5.000 a 1:1.000
De consulta	NO ES COMÚN							
Normativo		(X)	X	X		X	X	
Diseño		(X)	(X)	X		(X)	X	

X: Aplicable; (X): Podría aplicarse

Fuente: (SAG, 2007)

Se recomienda la definición del nivel de la zonificación, y las actividades requeridas, el tipo de zonificación preliminar, intermedia o avanzada, requiere de un inventario de deslizamientos existentes, caracterización del potencial de deslizamientos, distancia y velocidad de viaje y evaluación de la frecuencia, en niveles básico, intermedio y sofisticado respectivamente.

En la Tabla 23 se presentan las escalas y aplicaciones recomendadas para los diferentes mapas de zonificación

Tabla 23. Escalas de zonificación y aplicaciones.

Escala (Descripción)	Escala (Rango)	Ejemplos de aplicación	Área típica de zonificación
Pequeña	<1:100.000	Inventario de deslizamientos y susceptibilidad para informar al público en general.	> 10.000 km ²
Media	1:100.000 a 1:25.000	Inventario de deslizamientos y zonificación de susceptibilidad para análisis local y regional o proyectos de ingeniería a gran escala. Mapa preliminar del nivel de amenaza para áreas locales.	1.000 km ² - 10.000 km ²
Grande	1:25.000 a 1:5.000	Inventario de deslizamientos, zonificación de susceptibilidad y amenaza para áreas locales. Zonificación preliminar del nivel de riesgo para áreas locales y para etapas avanzadas de planeación para grandes estructuras de ingeniería, carreteras y vías férreas.	10 km ² -1.000 km ²
Detallado	>1:5.000	Zonificación intermedia a avanzada del nivel de amenaza y riesgo para áreas locales y sitios específicos y para la fase de diseño de grandes estructuras de ingeniería, carreteras y vías férreas.	Varias hectáreas a decenas de kilómetros.

Fuente: (SAG, 2007)

Con el objeto de unificar los rangos para la categorización del grado de susceptibilidad, amenaza y riesgo, pese a la dificultad en la cuantificación de los factores condicionantes, la variabilidad en los tipos de deslizamientos y la cuantificación de los procesos posteriores al movimiento, la SAG proporciona una descripción guía de los niveles de susceptibilidad para escenarios comunes: Caída de rocas, pequeños deslizamientos en taludes naturales y grandes deslizamientos en taludes naturales.

En la Tabla 24 se discriminan las categorías de susceptibilidad en alta, moderada, baja y muy baja, determinados cuantitativa y relativamente. Los descriptores cuantitativos para el

movimiento tipo caída de roca, se usan calculando la probabilidad de que el evento ocurra dado que este ya ha ocurrido en el pasado, y para los deslizamientos en taludes naturales se calcula como la proporción del área en donde ya han ocurrido este tipo de movimientos. Para el uso de los descriptores relativos se considera únicamente la proporción de deslizamientos registrados en la zona de estudio.

Tabla 24. Descriptores ejemplo para la zonificación de susceptibilidad a deslizamientos.

Descriptores de susceptibilidad	Caída de rocas	Pequeños deslizamientos en taludes naturales	Grandes deslizamientos en taludes naturales
(a) Descriptores de susceptibilidad cuantificados			
	Probabilidad de caída de rocas	Proporción de área en la cual podrían ocurrir pequeños deslizamientos	Proporción de área en la cual podrían ocurrir grandes deslizamientos
Alta	>0.5	>0.5	>0.5
Moderada	>0.25 a 0.5	>0.25 a 0.5	>0.25 a 0.5
Baja	>0.01 a 0.25	>0.01 a 0.25	>0.01 a 0.25
Muy baja	0 a 0.01	0 a 0.01	0 a 0.01
(b) Descriptores de susceptibilidad relativos			
Descriptores de susceptibilidad	Caída de rocas	Pequeños deslizamientos en taludes naturales	Grandes deslizamientos en taludes naturales
	Proporción de deslizamientos en el área de estudio	Proporción de deslizamientos en el área de estudio	Proporción de deslizamientos en el área de estudio
Alta	>0.5	>0.5	>0.5
Moderada	>0.1 a 0.5	>0.1 a 0.5	>0.1 a 0.5
Baja	>0.01 a 0.1	>0.01 a 0.1	>0.01 a 0.1
Muy baja	0 a 0.01	0 a 0.01	0 a 0.01

Fuente: (SAG, 2007)

Al igual que para la clasificación de la susceptibilidad, la guía recomienda descriptores para la zonificación de la amenaza y el riesgo.

En la Tabla 25 se especifican las recomendaciones del método para cada uno de los elementos considerados para la zonificación de deslizamientos:

Tabla 25. Recomendaciones para la zonificación de susceptibilidad

Elementos para la zonificación	Nivel de análisis	Actividades y Recomendaciones
Conocimiento del talud y las características geotécnicas	Básico a avanzado	<p>Conocimiento de la geología, geomorfología e hidrología.</p> <p>Mecanismos de falla.</p> <p>Información geotécnica de los taludes y comprensión del comportamiento del suelo o roca.</p>
SIG	Básico a avanzado	<p>La zonificación debe basarse en un SIG.</p> <p>Usar toda la información geográfica disponible, mapas geológicos, modelos de elevación digital, resultados de las exploraciones geotécnicas, fotos aéreas, mapas de vegetación, y toda aquella de interés para la caracterización de la zona de estudio, teniendo en cuenta fuentes privadas y gubernamentales.</p> <p>Es importante permitir la revisión, actualización, manipulación y consulta del SIG.</p> <p>El SIG debe incluir los mapas de susceptibilidad, amenaza y riesgo.</p>
Inventario de deslizamientos	Básico	<p>Debe incluir ubicación, clasificación, volumen, distancia de viaje y fecha de ocurrencia de los deslizamientos de la zona de estudio. Identificar la relación con la topografía, geología y geomorfología. La información encontrada debe reproducirse en mapas que contengan topografía, carreteras, cuerpos de agua y lo que se considere de interés.</p>

Elementos para la zonificación	Nivel de análisis	Actividades y Recomendaciones
	Intermedio	Además de las recomendaciones para el inventario básico, distinguir las partes de los deslizamientos, incluir en el mapa las características y contornos de los deslizamientos, recopilar y evaluar información histórica sobre la actividad de los deslizamientos, analizar la evolución de los usos del suelo, determinar la influencia de actividades humanas, mejorar la rigurosidad y cobertura del inventario.
	Avanzado	Además de las recomendaciones para el inventario intermedio, realizar inventario de información geotécnica, mejorar la definición de las condiciones geotécnicas mediante la implementación de investigaciones, incluir análisis geotécnicos para entender los procesos de inestabilidad de taludes. Realizar un análisis temporal de cada tipo de amenaza para su posterior uso en análisis avanzados de validación.
Caracterización de deslizamientos	Básico	<p>Calcular porcentaje de deslizamientos para cada nivel de susceptibilidad, porcentaje de área afectada para cada nivel de susceptibilidad, porcentaje de cada nivel de susceptibilidad comparado con el área total de estudio. Calcificar de acuerdo con la Tabla 24.</p> <p>Correlacionar la incidencia de deslizamientos con la geología, la pendiente, lluvia y actividad sísmica para delinear áreas susceptibles a deslizamientos de tierra.</p>
	Intermedio	Además de las recomendaciones para el método básico, obtener clasificación y estratificación básica del suelo de la zona de estudio, clasificar las unidades geológicas más complejas, clasificar cualitativa y cuantitativamente el área susceptible a deslizamientos (usar técnicas de superposición y tratamiento de datos respectivamente).
	Avanzado	Además de las recomendaciones para el método intermedio, detallar la investigación geotécnica para mejorar el entendimiento mecánico de los deslizamientos, la hidrología y los análisis de estabilidad, obtener la clasificación para la susceptibilidad mediante técnicas de tratamiento de datos como redes neuronales;

Elementos para la zonificación	Nivel de análisis	Actividades y Recomendaciones
		<p>lógica difusa y regresión logística.</p> <p>Realizar análisis de estabilidad.</p>
Distancia de viaje y velocidad	Básico	<p>Recopilar y evaluar información histórica de distancias y velocidad de viaje. Evaluar las distancias de viaje a partir de datos geomorfológicos para deslizamientos antiguos. Evaluar la distancia de viaje y velocidad probable a partir de geología, topografía y métodos empíricos. Evaluar la distancia de viaje máxima probable para cada nivel de susceptibilidad.</p>
	Intermedio	<p>Además de las recomendaciones para el método básico, clasificar el tipo de suelo y evaluar los posibles mecanismos de deslizamiento. Utilizar métodos empíricos basados en el ángulo de distancia de viaje o el ángulo de sombra para evaluar la distancia de viaje teniendo en cuenta la incertidumbre en los métodos empíricos. Evaluar la velocidad de la energía potencial y la distancia un deslizamiento usando modelos simples de deslizamiento de bloques.</p>
	Avanzado	<p>Además de las recomendaciones para el método intermedio, investigar las propiedades geotécnicas de los materiales de los deslizamientos. Usar modelos numéricos para modelar la distancia y la velocidad de viaje.</p>

Fuente: Modificado de SAG (2007)

Teniendo en cuenta las consideraciones mencionadas anteriormente, la guía recomienda para la zonificación de susceptibilidad a deslizamientos la generación de los siguientes mapas (superpuestos o no según la densidad de información y la escala seleccionada):

1. Mapa con inventario de deslizamientos.
2. Mapa con los factores que condicionan la inestabilidad (topografía, pendientes, unidades litológicas).
3. Áreas donde exista un alto potencial de deslizamientos superficiales, incluir las formaciones geológicas superficiales en el mapa.

4. Mapa con las distancias de viaje máximas.
5. Mapa de áreas clasificadas de acuerdo con el nivel de susceptibilidad encontrado.

Considerando los enfoques metodológicos presentados, la experiencia en los estudios referenciados y la naturaleza de los datos utilizados en esta investigación, **la metodología propuesta se basará en un enfoque heurístico**, el cual permite mediante la interpretación de los casos de estudio, asignar pesos que representen la variación de los parámetros geotécnicos para definir niveles de susceptibilidad del terreno a deslizamientos. Con referencia a los demás métodos citados, se puede decir que los determinísticos se basan en el resultado del cálculo del factor de seguridad en el área de estudio y requieren implícitamente la determinación de las propiedades geotécnicas, por lo que los resultados obtenidos de esta investigación no son fácilmente aplicables, y en cuanto a los métodos estadísticos se considera necesario un mayor volumen de información.

Capítulo II

Estudio de Casos y Análisis de Resultados

2.1 Estudio de casos

En este apartado, se presenta uno a uno los casos encontrados y analizados, donde se muestra de manera general la descripción del movimiento de tierra, la geología y el análisis de estabilidad correspondiente. Con el fin de hacer más amena la lectura y análisis de todo el contenido del presente capítulo, en realiza Anexo “A” en el que se discrimina y detalla toda la información como soporte y medio de consulta, en el que se relacionan los siguientes casos estudiados, así:

1. Estudio de un caso sobre la causa del deslizamiento en Santa Clara, California, EE. UU.
2. Deslizamiento en Zhenxiong, Yunnan, suroeste de China.
3. Análisis de estabilidad para el deslizamiento en el distrito de Pune, India.
4. Los deslizamientos de la cuenca baja del río Darro.
5. Métodos de monitoreo en los deslizamientos Montes Cárpatos, Polonia.
6. Modelación numérica del efecto de la lluvia en el deslizamiento de Azazga, Argelia.

7. Comportamiento de una pendiente coluvial ubicada en el sureste de Brasil
8. Investigación del deslizamiento Fu Yung Shan Tsuen, Hong Kong.
9. Caracterización geotécnica y análisis numérico del deslizamiento de Sarak en India.
10. Análisis de estabilidad del deslizamiento Portalet en los Pirineos.
11. Deslizamientos en las cuencas del noreste margen de la meseta tibetana.
12. Evaluación de la estabilidad de un talud de alta pendiente en un deslizamiento en Turquía.
13. Estabilización del deslizamiento de Cortiana en el noreste de Italia.
14. Estudio del caso en un deslizamiento en el sur de Italia.
15. Estudio de deslizamientos en temporada de lluvias con análisis numérico.
16. Estudio de análisis de estabilidad en una zona de alta complejidad en los Alpes Italianos.
17. Modelación con elementos finitos para la evaluación de la estabilidad de taludes de roca y detritos.
18. Análisis de un deslizamiento de suelo residual en Rio de Janeiro, Brasil.

2.2 Análisis de Resultados

De acuerdo con los análisis de estabilidad desarrollados en los casos de estudio, en la Tabla 26 se presenta un resumen de los parámetros obtenidos en cada uno de ellos, los cuales buscan mostrar lo encontrado en cuanto al origen geológico (residual o coluvial), comportamiento o tipo de suelo (cohesivo o granular), parámetros de resistencia al corte y peso específico del suelo. Finalmente se presentan los resultados de los análisis de estabilidad (Factor de Seguridad) y análisis de elementos finitos (Factor de Reducción de Esfuerzo), tal como se discrimina a continuación:

Tabla 26. Resumen de resultados.

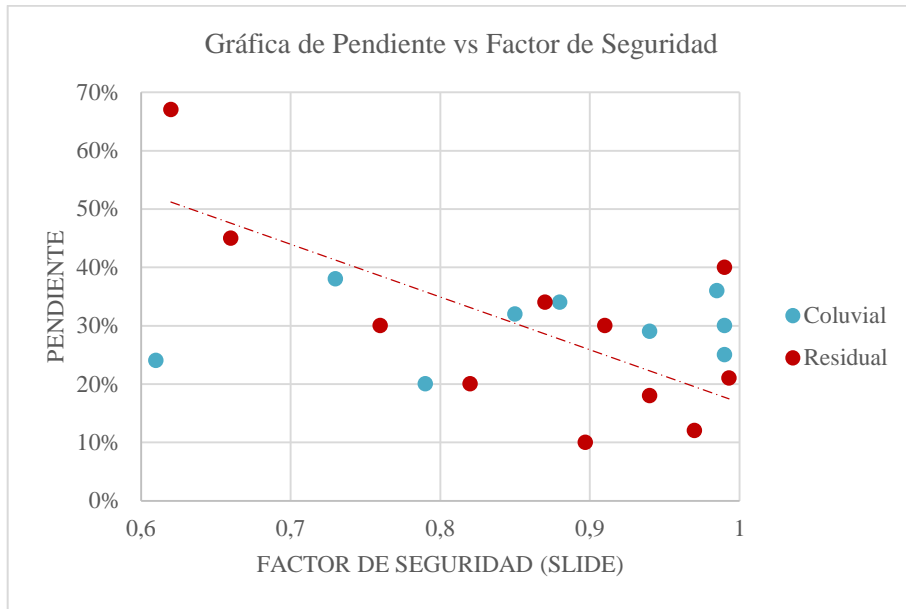
#	CASO	Geología - Suelo		Parámetros de resistencia			Pendiente promedio	Estabilidad de taludes	Elementos finitos
		Origen	Comportamiento	Ang. de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)		Factor de seguridad Origen	
1	1	Coluvial	Cohesivo	11	18	15	30%	0.99	1.11
2	2	Coluvial	Cohesivo	22	30	18.5	32%	0.85	0.78
3	3	Residual	Cohesivo	19	51	18.5	45%	0.66	0.61

4	4	Residual	Cohesivo	22	14.5	18.9	20%	0.82	0.87
5	5.1	Coluvial	Cohesivo	23	31	14	24%	0.61	0.52
6	5.2	Coluvial	Cohesivo	23	31	14	20%	0.79	0.67
7	5.3	Coluvial	Cohesivo	23	31	14	38%	0.73	0.7
8	6	Residual	Cohesivo	3	28	18	10%	0.897	0.6
9	7	Coluvial	Granular	29	0	20	36%	0.83	0.8
10	8	Coluvial	Granular	39	1	15.6	34%	0.89	1.37
11	9	Residual	Granular	31	20	20.5	18%	0.94	0.91
12	10	Residual	Cohesivo	22	10	21.7	12%	0.97	0.97
13	11	Residual	Cohesivo	21	102.5	21.3	34%	0.87	0.86
14	12	Residual	Granular	24	10.2	21	30%	0.91	0.91
15	13	Residual	Cohesivo	20	8	20	30%	0.76	0.52
16	14	Residual	Cohesivo	22	8.8	17.8	21%	0.85	0.85
17	15	Coluvial	Cohesivo	21.3	22	20.5	25%	0.99	0.95
18	16	Coluvial	Granular	27	10	20	29%	0.896	0.81
19	17	Residual	Granular	33	8	20.3	67%	0.62	0.55
20	18	Residual	Granular	34	9.6	17.1	40%	0.99	0.91

Fuente: Propia

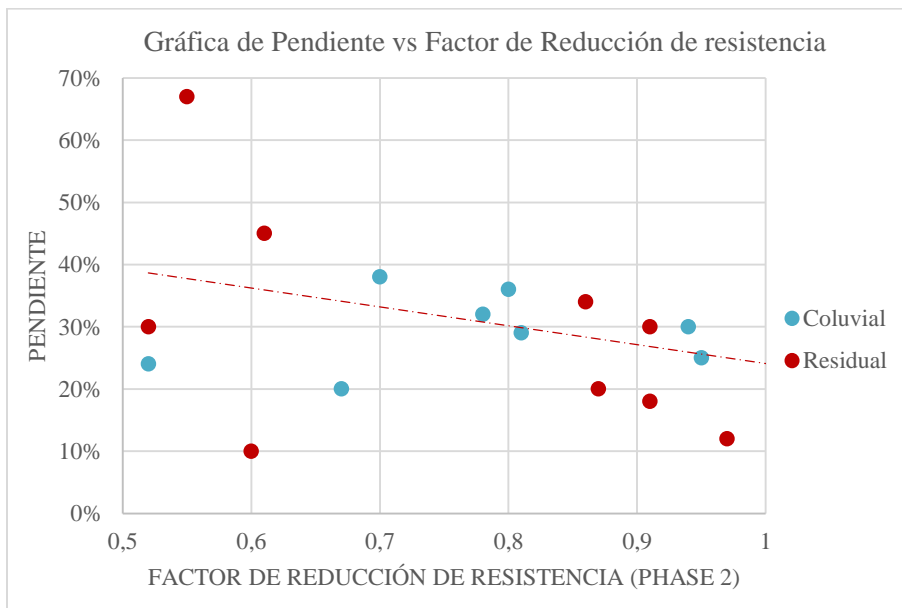
Para comenzar el análisis, se comparan los resultados obtenidos de los Factores de Seguridad (FS) con los valores de pendiente. Para los suelos residuales analizados, los FS oscilan entre 0.62 y 0.99 y la pendiente entre el 10% y el 67%, en cuanto a los suelos coluviales, el FS varía entre 0.61 y 0.99 y la pendiente entre 20% y 38%.

En la Gráfica 1 se presenta la variación del FS con respecto a la pendiente del talud, con el FS en el eje de las ordenadas y la pendiente en las abscisas, se percibe que los materiales residuales tienen factores de seguridad menores cuando la pendiente es mayor, así, para FS cercanos al equilibrio límite, la pendiente tiene un valor medio del 20% y para el FS más bajo con valor de 0.62 la pendiente del terreno corresponde al 67%. En cuanto a los suelos coluviales, en la Gráfica 1 no se aprecia una buena correlación entre el FS y la pendiente, sin embargo, se puede observar que las pendientes que condicionaron la falla tienen valores entre el 20% y 38%.

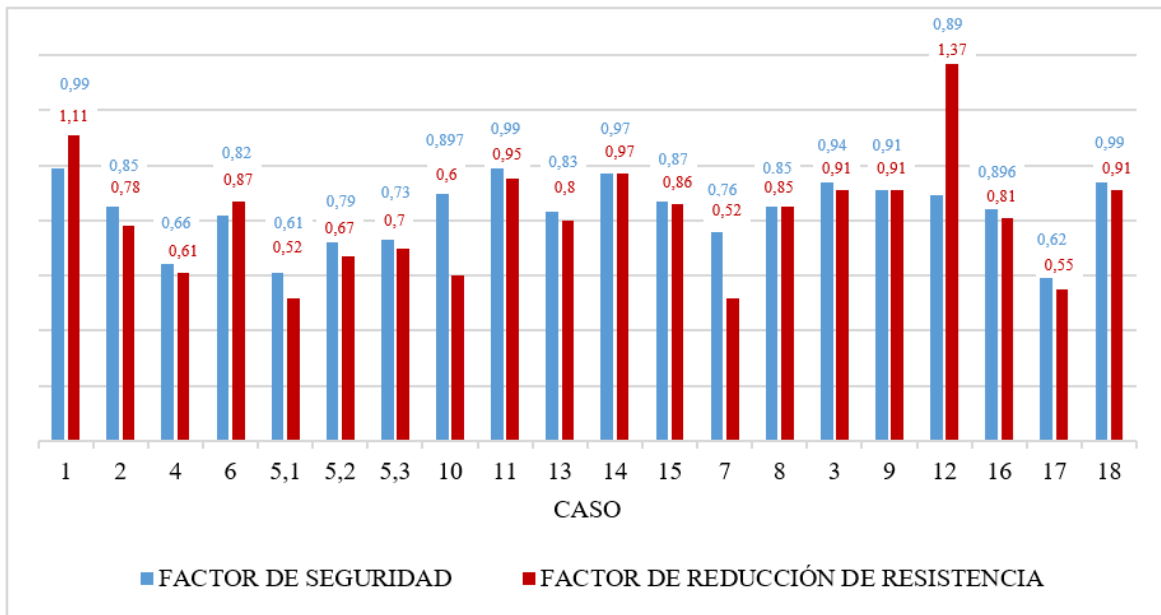


Gráfica 1. Grafica de pendiente vs Factor de Seguridad.

En la Gráfica 2 se presenta la comparación de los resultados del Factor de Reducción de Esfuerzos (SRF) contra la pendiente promedio de los taludes, el cual muestra un comportamiento parecido al del Factor de Seguridad, con una mayor dispersión en el suelo residual.



Gráfica 2. Gráfica de pendiente vs Factor de reducción de resistencia



Gráfica 3. Factor de seguridad y reducción de resistencia obtenidos en cada caso.

En la Gráfica 3, se presentan los factores de seguridad y de reducción de resistencia obtenidos en cada caso, en donde se observa la similitud entre las magnitudes y el mismo comportamiento con respecto al total de estudios, sólo en tres de los casos la diferencia entre los valores de FS y SRF es superior a 0,2, y coluvial, por lo que se considera que el FS es representativo para el análisis posterior realizado para los depósitos de suelo residual considerando además que es el factor de común uso para el análisis de sensibilidad a deslizamientos en las metodologías existentes.

2.2.1 Depósitos Coluviales

A continuación, se presenta en la Tabla 27 el resumen de los resultados únicamente para los depósitos de origen coluvial; dentro de los casos de análisis el comportamiento cohesivo fue el más común, en algunos de los taludes en los que encontró conjuntamente materiales cohesivos y granulares, la falla se generó con mayor frecuencia en el material cohesivo. Para el análisis de la susceptibilidad del deslizamiento frente a las propiedades geotécnicas, se estudió el ángulo de fricción, la cohesión, el índice de plasticidad y el porcentaje de finos. De acuerdo con la disponibilidad de información en cada caso, en la Tabla 27 se presentan los índices de plasticidad

para los suelos de comportamiento cohesivo, al igual que el porcentaje de finos para ambos tipos de material.

Tabla 27. Resumen de resultados depósitos coluviales.

#	CASO	Comportamiento	Parámetros de resistencia			Pendiente promedio	Estabilidad de taludes	Elementos finitos	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)	Humedad natural (%)	Porcentaje de finos (%)
			Ang. de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)		Factor de seguridad	Strength reduction factor (SRF)					
1	1	Cohesivo	11	18	15	30%	0.99	0.94					
2	2	Cohesivo	22	30	18.5	32%	0.85	0.78				20.3	
5	5.1	Cohesivo	23	31	14	24%	0.61	0.52	50	23	27	25.3	90.7
6	5.2	Cohesivo	23	31	14	20%	0.79	0.67	50	23	27	25.3	90.7
7	5.3	Cohesivo	23	31	14	38%	0.73	0.7	50	23	27	25.3	90.7
9	7	Granular	29	0	20	36%	0.83	0.8			25	22	45
10	8	Granular	39	1	15.6	34%	0.89	1.37				11	13
17	15	Cohesivo	21.3	22	20.5	25%	0.99	0.95	54	28	26		50
18	16	Granular	27	10	20	29%	0.896	0.81					

Fuente: Propia

En la Tabla 28 se describen estadísticamente los resultados de los parámetros geotécnicos obtenidos en los deslizamientos estudiados. Para cada tipo de comportamiento, cohesivo y granular, se relaciona el rango de la pendiente y los parámetros geotécnicos estudiados, con su respectivo rango, media y desviación estándar.

Tabla 28. Variación de las propiedades geotécnicas de suelos coluviales en deslizamientos

Comportamiento	Pendiente (%)	Parámetro	Rango			Media	Desviación estándar
Cohesivo	20 -38	Ángulo de fricción (°)	11,0	-	23,0	20,6	4,3
		Cohesión (kPa)	18,0	-	31,0	27,2	5,2
		Índice de plasticidad (%)	25,0	-	27,0	26,0	0,6

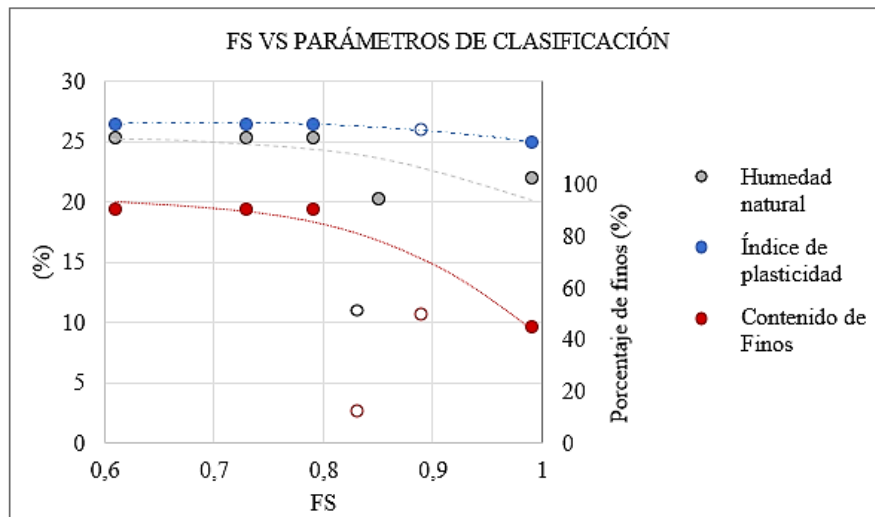
		Porcentaje de finos (%)	45,0	-	90,7	79,3	19,8
Granular	29-36	Ángulo de fricción (°)	27,0	-	39,0	31,7	5,2
		Cohesión (kPa)	0,0	-	10,0	3,7	4,5
		Porcentaje de finos (%)	13,0		50,0	31,5	18,5

* La desviación estándar en la pendiente de suelo cohesivo corresponde al 6% y en suelo granular al 3%

Fuente: Propia

Para el análisis se evaluó la variación del factor de seguridad según los resultados obtenidos de resistencia y clasificación en cada uno de los casos. En la Gráfica 4 se presentan los resultados de los ensayos de clasificación encontrados con mayor frecuencia en los casos de análisis, el índice de plasticidad para los materiales cohesivos y la fracción de limo o arcilla presente en los materiales con comportamiento granular, así como el porcentaje de finos y la humedad natural. En el eje vertical izquierdo se presentan la humedad natural y el índice de plasticidad, los puntos azules y grises muestran la variación de estos dos parámetros con respecto al FS ubicado en el eje horizontal. En el eje vertical derecho se presentan los porcentajes de finos. Ya que sólo 3 de los 9 casos de estudio de suelo coluvial tienen comportamiento granular, en la Gráfica 4 se incluyen todos los resultados de los tres parámetros de clasificación básica, con el fin de mostrar el comportamiento general de este tipo de suelos de origen coluvial, sin embargo, se diferencia el resultado en suelo granular mediante los círculos vacíos. Pese a la poca información de suelos granulares coluviales, la ubicación de estos resultados en la Gráfica 4 permite deducir que en general, los suelos coluviales de comportamiento granular tienen factores de seguridad más altos.

De acuerdo con la tendencia de los datos obtenidos (según la Gráfica 4), es posible concluir que los FS más bajos tienen el índice de plasticidad más alto, mayor humedad y mayor porcentaje finos, a medida que la magnitud de los parámetros disminuye el FS tiende a 1.

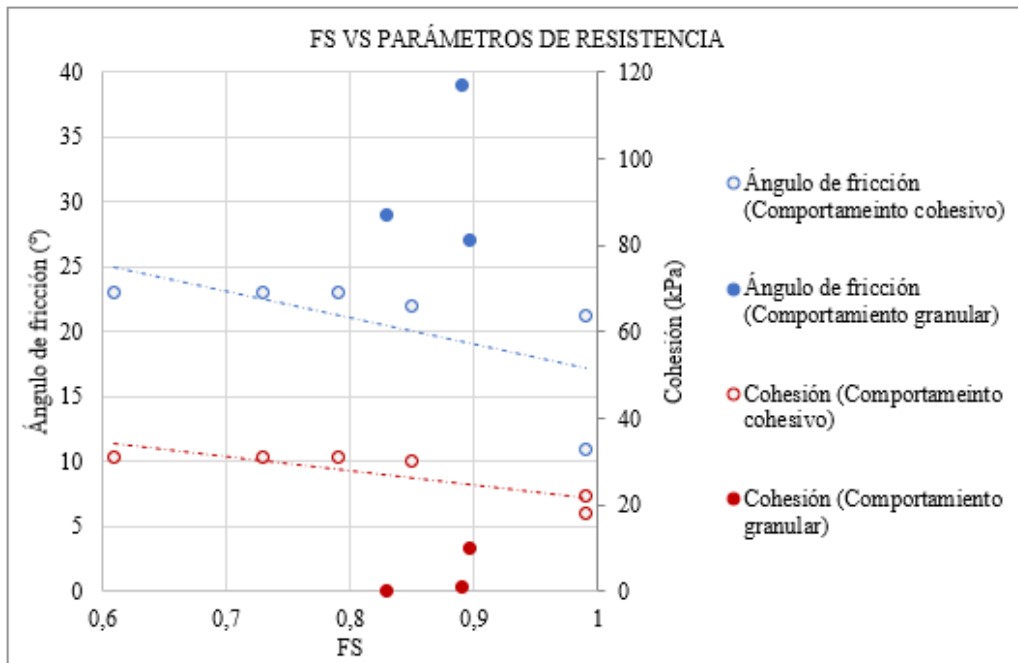


Gráfica 4. Variación del factor de seguridad con los parámetros de clasificación en suelos coluviales. Índice de plasticidad y humedad en eje vertical izquierdo, contenido de finos en eje vertical derecho. Los círculos vacíos corresponden a suelos granulares.

En la Gráfica 5 se presenta la variación del ángulo de fricción y de la cohesión de los materiales en donde se generó la falla de los taludes de suelo coluvial, tanto los de comportamiento cohesivo como granular. En los suelos cohesivos, correspondientes a la mayoría de los análisis, se evidencia que a medida que el ángulo de fricción y la cohesión disminuyen, el FS se acerca a la unidad. Cabe notar que los FS menores que 0.8 tienen diferencias entre ellos de hasta el 30%, pese a que los parámetros de resistencia son iguales.

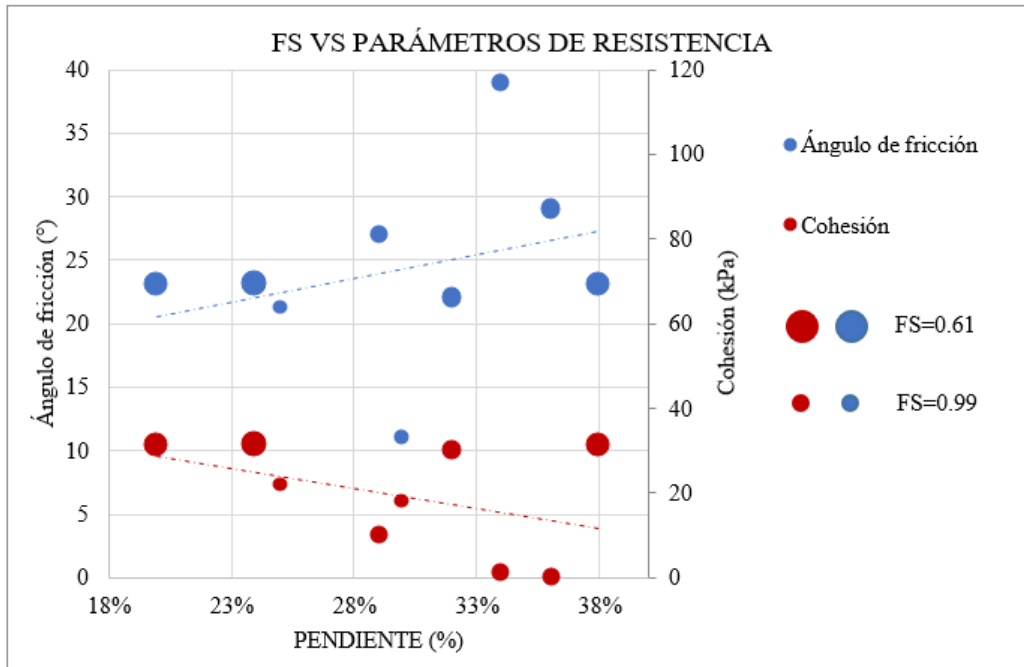
En cuanto a los suelos de comportamiento principalmente granular, se encontró que la cohesión asociada a la fracción fina no influye en el factor de seguridad, y el ángulo de fricción sugiere una tendencia inversamente proporcional, sin embargo, se considera que no hay información suficiente para asegurar la correlación.

Por otro lado, se observa que los factores de seguridad de menor magnitud asociados a la falla global de cada talud se presentaron en los suelos coluviales cohesivos, con un rango aproximado de 0.61 a 0.99, mientras que en los coluviales de comportamiento granular el FS varía entre 0.83 y 0.87, lo que puede indicar que el grado de inestabilidad del talud puede ser mayor cuando el componente cohesivo del suelo rige el proceso de falla.



Gráfica 5. Variación del factor de seguridad con los parámetros de resistencia en suelos coluviales

Con respecto a la pendiente del talud, se observa en la Gráfica 6 una correlación aproximadamente lineal con el ángulo de fricción y la cohesión, de forma ascendente y descendente respectivamente, lo que muestra que en los taludes de mayor pendiente los ángulos de fricción tienen magnitudes más altas y una cohesión menor. En esta grafica se presenta simultáneamente el resultado del FS (de acuerdo con el tamaño de los círculos), los diámetros mayores corresponden a los factores asociados a la mayor inestabilidad; el resultado permite definir que para los suelos coluviales el FS no se ve influenciado por la pendiente, se presentan factores de seguridad menores a 0.7 en los taludes inclinados en el rango completo de análisis, de 20% a 38%.



Gráfica 6. Variación de los parámetros de resistencia con la pendiente en suelos coluviales

De acuerdo con los resultados anteriormente expuestos, los materiales cohesivos con índices de plasticidad superiores al 25%, con un ángulo de fricción y una cohesión de hasta 23° y 31 kPa respectivamente, deben considerarse altamente influyentes en la susceptibilidad del talud a presentar falla, si este tiene una pendiente superior al 20%.

En cuanto a los coluviales de comportamiento granular, se encontró que incluso materiales puramente friccionales con pendientes del 36°, pueden contribuir a la condición de falla del talud, como se presentó en los casos estudiados. No se tiene suficiente información sobre la distribución granulométrica de los materiales granulares, sin embargo, el rango en el porcentaje de finos, indica que la falla en este tipo de materiales puede darse con una proporción significativa de limos y/o arcillas, o solo con valores cercanos al 10%.

Teniendo en cuenta los resultados del análisis de estabilidad en cada caso de estudio, se encontró que el espesor del suelo y la variación en el nivel freático establece el detonante más común en el evento de falla, influyendo directamente en la magnitud del factor de seguridad o incluso en la existencia del deslizamiento.

De acuerdo con lo anterior, se analizaron las propiedades geométricas de la capa en donde se presentó la falla (espesor y profundidad), la profundidad de la superficie de falla y el nivel freático, discriminando los resultados de acuerdo con el tipo de comportamiento, cohesivo o granular. En la Figura 8 se presenta un esquema con las variables consideradas en el análisis:

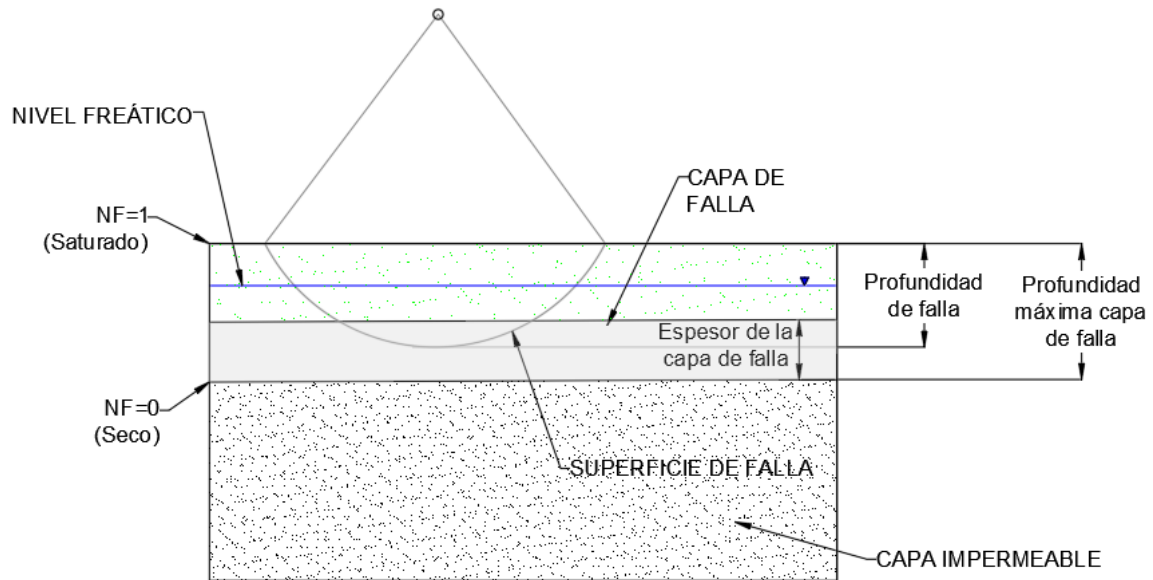
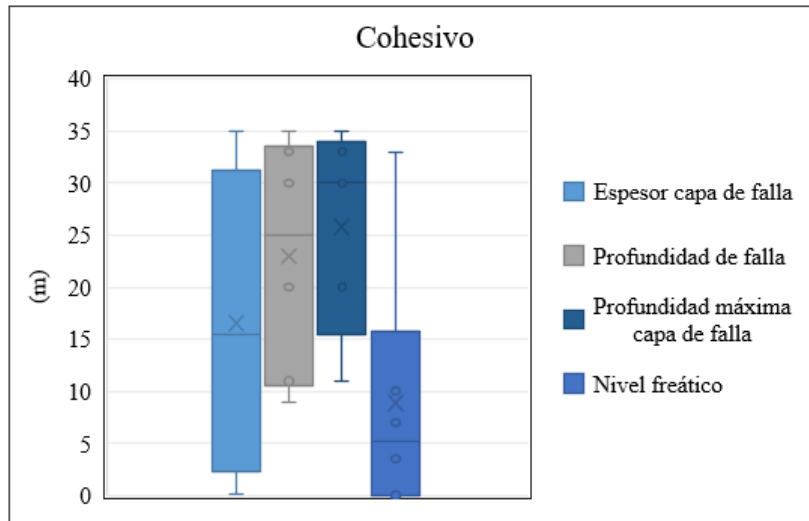
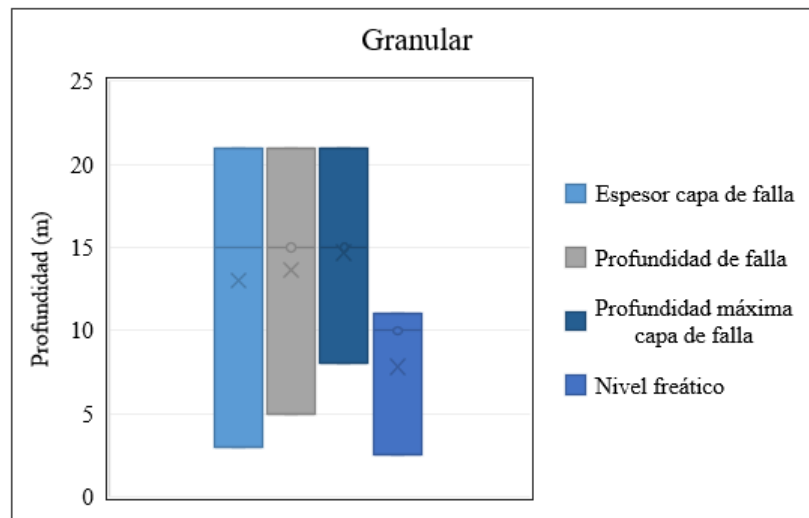


Figura 8. Esquema de variables geométricas de la capa de falla, superficie de falla y nivel freático.

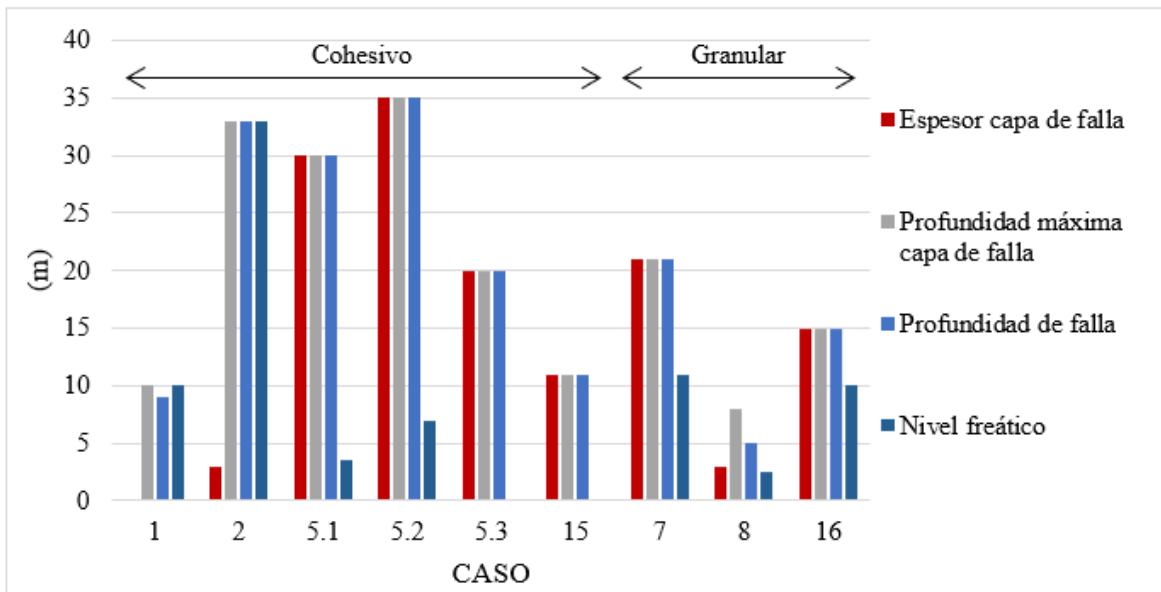
En la Gráfica 7 se presenta mediante diagramas de cajas la variación en la magnitud de las dimensiones analizadas en los suelos coluviales de comportamiento cohesivo y en la Gráfica 8 los de comportamiento granular. En la Gráfica 9 se muestran los resultados por caso, para ambos tipos de comportamiento. Los casos en los que el nivel freático no fue considerado en el análisis de estabilidad no fueron considerados en los siguientes análisis.



Gráfica 7. Variación en profundidades y nivel freático, en suelos cohesivos



Gráfica 8. Variación en profundidades y nivel freático, en suelos granulares



Gráfica 9. Profundidades y nivel freático por caso

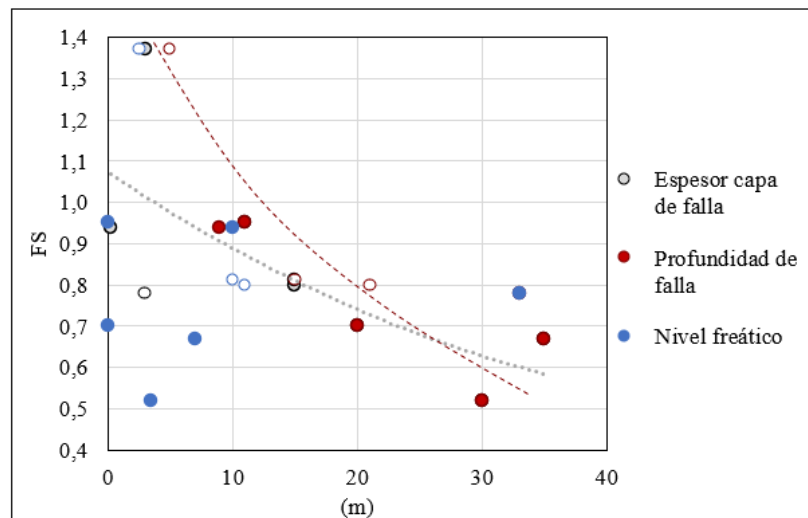
Dentro de los casos de estudio se presentaron dos casos en los cuales la capa en donde se generaron los mayores esfuerzos de corte y simultáneamente se desarrolló la superficie de falla, no corresponde a la capa superficial; en el caso 1 la falla se generó a lo largo de una capa débil intermedia muy delgada y en el caso 2 la capa de falla corresponde a un coluvial profundo delgado de menor resistencia a la capa superficial. (Gráfica 9)

Como se observa en la Gráfica 7, los espesores de la capa de falla varían entre 0.2 m y 35 m y la profundidad de la falla tiene valores entre 9 m y 35 m, esto refleja la existencia de las capas de falla intermedias identificadas en el caso 1 y 2. En los suelos granulares el espesor de la capa de falla varía entre 3 m y 21 m, mientras que la profundidad de falla varía entre 5 m y 21 m (Gráfica 8).

De la profundidad máxima de la capa de falla es posible deducir que en todos los casos la zona de contacto con el material subyacente, es el medio en que se genera la falla, por lo que se cumple que todas las barras grises de la Gráfica 9 tengan aproximadamente la misma altura de las barras de color azul claro, salvo en el caso 8 en donde la superficie de falla excede parcialmente el coluvión capa superficial, pero en este la roca meteorizada ubicada en la parte inferior tiene propiedades geotécnicas similares, por lo que el cambio de rigidez no es muy marcado.

En cuanto al nivel freático, se encontraron variación entre 0 m y 35 m para los depósitos cohesivos y entre 3 m y 11 m para los depósitos granulares, es decir que el nivel freático se puede encontrar tanto a la profundidad de falla como en superficie para deslizamientos en suelos coluviales cohesivos, y en los suelos granulares este rango disminuye, no fue necesaria la saturación del terreno para que se presentara la falla del talud.

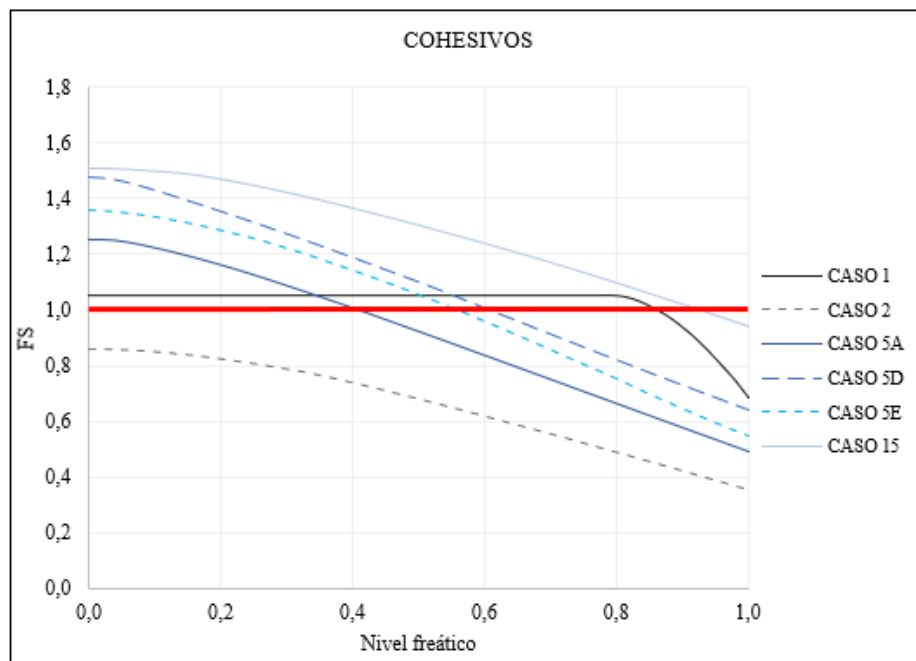
En la Gráfica 10 se presenta la variación del FS de cada caso de suelo coluvial con respecto a los parámetros geométricos definidos para la falla y el nivel freático, los círculos vacíos representan los casos de comportamiento granular. Se encontró que el FS es inversamente proporcional a la profundidad de la falla, con los menores FS en las superficies más profundas, lo mismo ocurre con el espesor de la falla, sin embargo, este parámetro presenta una mayor dispersión. En cuanto al nivel freático, no se considera que los resultados obtenidos evidencien una correlación.



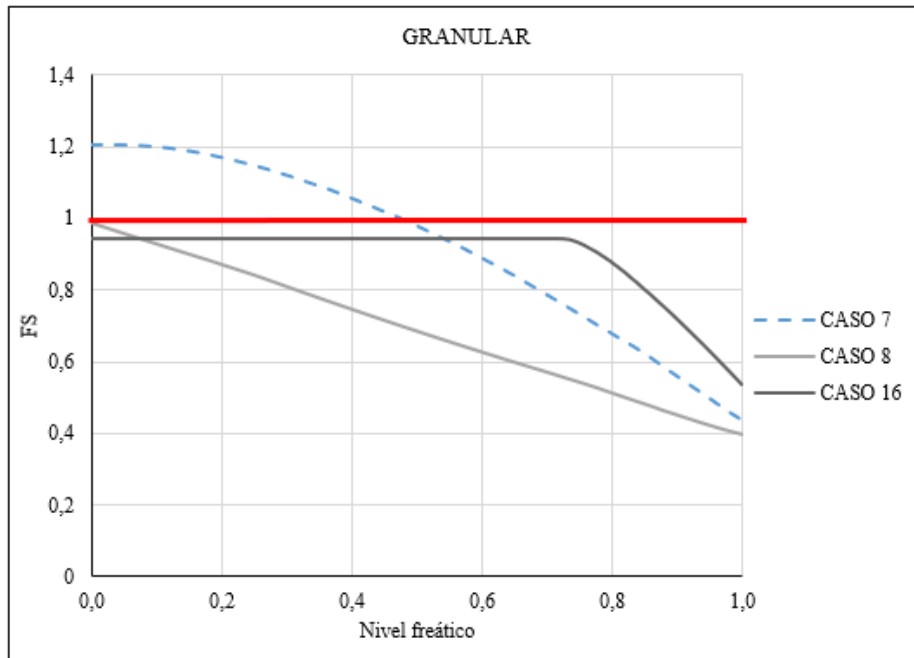
Gráfica 10. Variación del FS con respecto a al espesor de la capa de falla, profundidad de falla y nivel freático

Con el fin de definir la influencia de la posición del nivel freático con respecto al FS, que no se refleja en la Gráfica 10, se realizó un análisis de sensibilidad para cada caso, del cual se obtuvieron curvas de FS contra la posición del nivel freático, considerando la variación de este último factor de 0 a 1, siendo 0 la profundidad máxima que puede alcanzar el nivel freático (correspondiente al contacto con la roca madre o la profundidad máxima de la capa de falla, dependiendo del perfil) y 1 la condición en la cual la lámina de agua se encuentra en superficie y el suelo se encuentra saturado (Ver Figura 8).

De acuerdo con la Gráfica 11, se encontró que la profundidad relativa del nivel freático afecta de diferentes maneras la estabilidad en cada caso de suelo cohesivo, en el caso 2 la falla se presenta independientemente de la posición del nivel freático, mientras que en los casos 1 y 15, la falla se genera cuando la posición del nivel freático esta próxima a saturar la totalidad del perfil, para el resto de los casos, una saturación de aproximadamente el 50 % de la capa de falla, desencadena el deslizamiento. Se observa además que el comportamiento es similar en cada caso: relativamente proporcional, decreciente y con una disminución de aproximadamente el 50% del FS para la variación máxima del nivel freático. Para los casos en suelo granular que se presentan en la Gráfica 12, los casos 8 y 16 evidencian falla incluso en estado seco y el caso 7 tiene un comportamiento similar al de los suelos cohesivos, se observa un comportamiento diferente en las curvas de los tres casos. En los casos 1 y 16, cohesivo y granular respectivamente, se encontró que el ascenso en el nivel freático incluso hasta el 80% de la altura total de la capa de falla no afecta el FS, manteniéndose constante hasta alcanzar el 20% superficial de la capa, después de esto el FS disminuye con una mayor pendiente que los demás casos. (Gráfica 11 y la Gráfica 12)

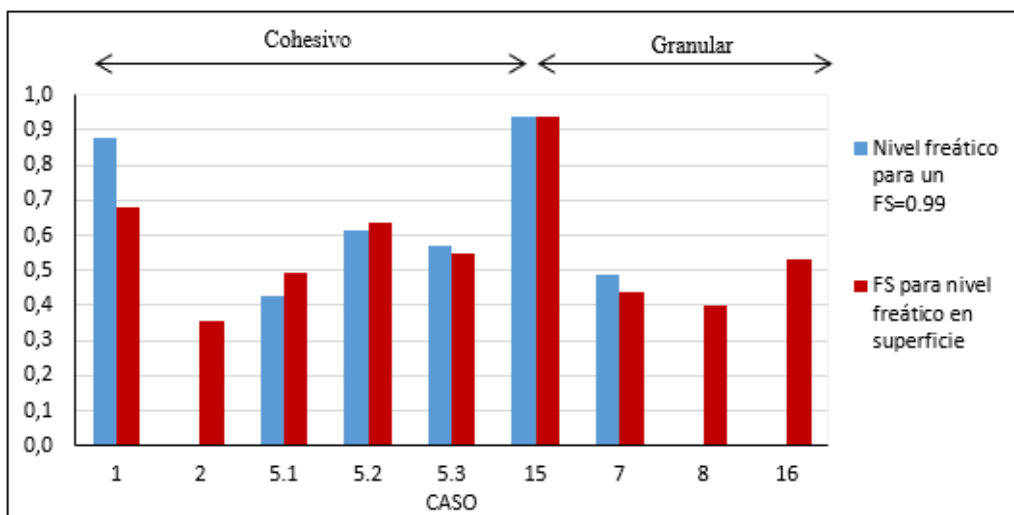


Gráfica 11. Variación del FS contra el nivel freático en los casos con suelos cohesivos



Gráfica 12. Variación del FS contra el nivel freático en los casos con suelos cohesivos

Para cada caso, en la Gráfica 13 se presenta el nivel del agua dentro de la capa de falla con el cual el talud alcanza un FS de 0.99 y el valor del FS obtenido cuando el nivel freático se encuentra en superficie. Aunque los resultados no son homogéneos en todos los casos, se encuentra que para los suelos coluviales, indistintamente del tipo de comportamiento, la saturación del talud implica la falla con FS de incluso 0.3.



Gráfica 13. Nivel freático requerido para la falla y FS con el nivel freático en superficie

Lo anterior ratifica la importancia de establecer adecuadamente la estratigrafía del medio, los cambios de rigidez y la posición del nivel freático como parte de un análisis de susceptibilidad al deslizamiento. Sin embargo, los resultados no evidencian el mismo comportamiento en todos los casos y la definición de estos parámetros implicaría la ejecución de estudios detallados, estos factores limitan el uso de los resultados obtenidos en la metodología propuesta en el capítulo 3.

2.2.1 Depósitos Residuales

Los suelos de origen residuales son materiales que permanecen in situ cuando parte de una roca se transforma por procesos químicos de meteorización, generalmente disolución o lixiviación que actúan principalmente sobre la roca. Normalmente este tipo de suelos presentan un comportamiento cohesivo, lo cual se sustenta en esta investigación, ya que se presenciaron mayores casos de este tipo, sin embargo, el comportamiento granular también hizo parte de las investigaciones de referencia, por lo que se seleccionaron, los mismos parámetros analizados en los suelos coluviales. Teniendo en cuenta lo anterior, en la Tabla 29 se presenta un resumen de los resultados en los casos analizados en depósitos residuales.

Tabla 29. Resumen de resultados, suelos residuales.

#	CASO	Comportamiento	Parámetros de resistencia			Pendiente promedio	Estabilidad de taludes	Elementos finitos	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)	Humedad natural (%)	Porcentaje de finos (%)
			Ang. de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)		Factor de seguridad	Strength reduction factor (SRF)					
3	3	Cohesivo	19	51	18,5	45%	0,66	0,61	50	30	20	23,1	
4	4	Cohesivo	22	14,5	18,9	20%	0,82	0,87	32	19	13	12,9	
8	6	Cohesivo	3	28	18	10%	0,897	0,6					
12	10	Cohesivo	22	10	21,7	12%	0,97	0,97					
13	11	Cohesivo	21	102,5	21,3	34%	0,87	0,86	52	27	25		

15	13	Cohesivo	20	8	20	30%	0,76	0,52					
16	14	Cohesivo	22	8,8	17,8	21%	0,85	0,85	71	29	42		100
11	9	Granular	31	20	20,5	18%	0,94	0,91	51	21	30	6,4	1,2
14	12	Granular	24	10,2	21	30%	0,91	0,91	47	20	27		21,3
19	17	Granular	33	8	20,3	67%	0,62	0,55				10	70
20	18	Granular	34	9,6	17,1	40%	0,99	0,91				6,4	18

Fuente: Propia

En la Tabla 30 se presenta el rango y algunas medidas de tendencia central, que describen estadísticamente los valores de los parámetros geotécnicos obtenidos en los deslizamientos estudiados.

Tabla 30. Variación de las propiedades geotécnicas de suelos residuales en deslizamientos

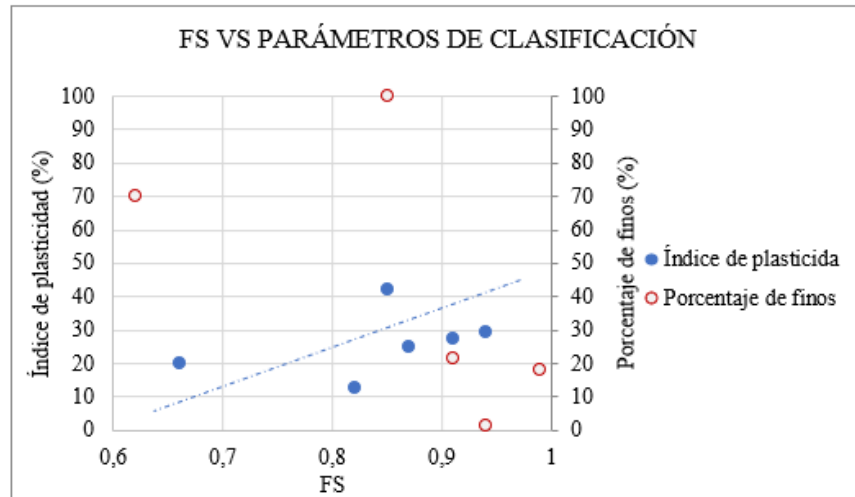
Comportamiento	Pendiente (%)	Parámetro	Rango	Media	Desviación estándar
Cohesivo	10-45	Límite líquido (%)	32,0 - 71,0	51,3	13,7
		Límite plástico (%)	19,0 - 30,0	26,4	4,2
		Índice de plasticidad (%)	13,0 - 42,0	25,0	10,8
		Ángulo de fricción (°)	3,0 - 22,0	18,4	6,4
		Cohesión (kPa)	8,0 - 102,5	31,8	32,2
Granular	18-67	Ángulo de fricción (°)	24,0 - 34,0	30,5	3,9
		Cohesión (kPa)	8,0 - 20,0	12,0	4,7
		Porcentaje de finos (%)	1,2 - 37,0	19,4	12,7

* La desviación estándar en la pendiente de suelo cohesivo corresponde al 12% y en suelo granular al 9%

Fuente: Propia

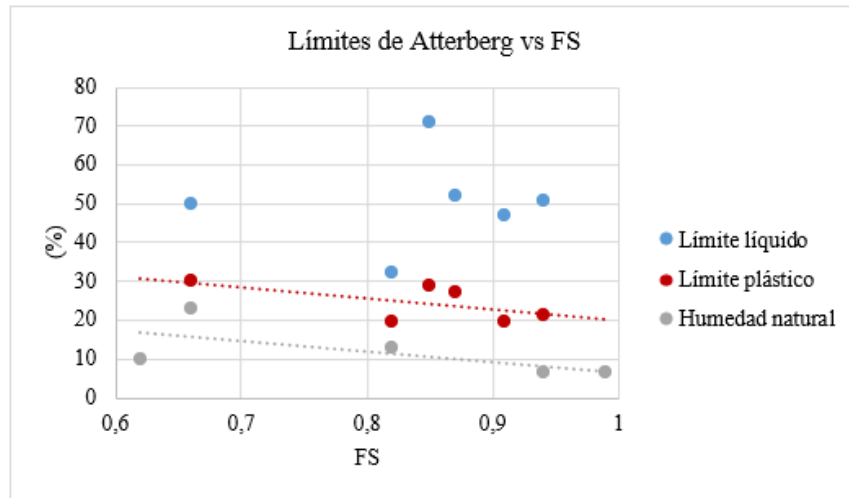
Considerando los resultados de los ensayos de clasificación, se tiene que el porcentaje de finos no se correlaciona con el factor de seguridad, como se presenta en la Gráfica 14, sin embargo se menciona que el porcentaje de finos en los suelos residuales de comportamiento cohesivo, corresponde según los casos de estudio, al 100% y en cuanto a los materiales granulares, el porcentaje puede ser muy variable con una desviación estándar del 12,7%, lo que puede sugerir que el porcentaje de finos no condiciona el grado de inestabilidad del talud y que para diferentes contenido de limo o arcilla en materiales de comportamiento granular es posible la generación de la

falla. Por otro lado, el comportamiento del índice de plasticidad con respecto al FS se puede considerar proporcional.



Gráfica 14. Variación del factor de seguridad con los parámetros de clasificación en suelos residuales

La variación del FS con respecto a la humedad natural y los límites de consistencia, que fueron recopilados de los casos con suelos residuales de comportamiento cohesivo, se presenta en la Gráfica 15. Se observa un comportamiento inverso con respecto a la humedad y el límite plástico, y con respecto al límite líquido no se considera que exista una correlación alta, sin embargo, los valores tienden a incrementar simultáneamente. Para los casos en los cuales la humedad y el límite plástico fueron mayores, el resultado en el FS establece la máxima inestabilidad, como se observa en la Gráfica 15 todas los contenidos de agua registrados en los suelos residuales están por debajo del límite plástico.



Gráfica 15. Variación del factor de seguridad con los límites de Atterberg

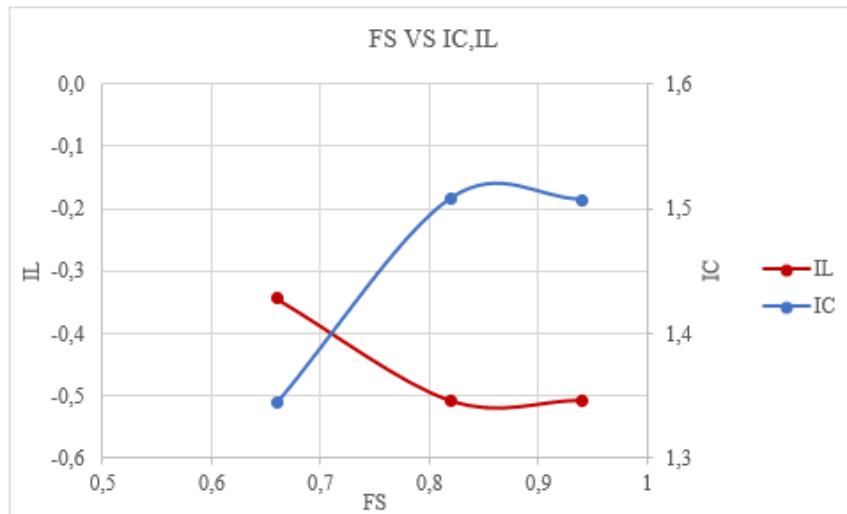
En la Tabla 31 se presenta los resultados de índice de consistencia y de liquidez, calculados para los suelos residuales en donde se contaba simultáneamente con el valor del contenido de agua y los límites de Atterberg. El índice de liquidez en los tres casos es negativo, debido a que la humedad natural es mayor que el límite plástico, por lo tanto, su estado se considera sólido, el comportamiento esfuerzo deformación tiende a ser frágil y en cuanto a su historia de esfuerzos, podría tratarse de suelos sobreconsolidados. Por su parte, el índice de consistencia obtenido tiene un valor medio de 1.5, lo que refleja que el límite líquido es mayor que la humedad natural del suelo, y se considera un suelo rígido.

En la Gráfica 16 se presenta la variación de los resultados con respecto al FS, encontrando que el IC incrementa con el FS, es decir que entre menor sea la humedad con respecto al límite líquido el FS es mayor. Con respecto al índice de liquidez, el comportamiento es inverso.

Tabla 32. Índice de consistencia y liquidez

LL (%)	LP (%)	IP (%)	Wn (%)	IC	IL	FS
50	30	20	23	1,3	-0,3	0,66
32	19	13	13	1,5	-0,5	0,82
51	21	30	6	1,5	-0,5	0,94

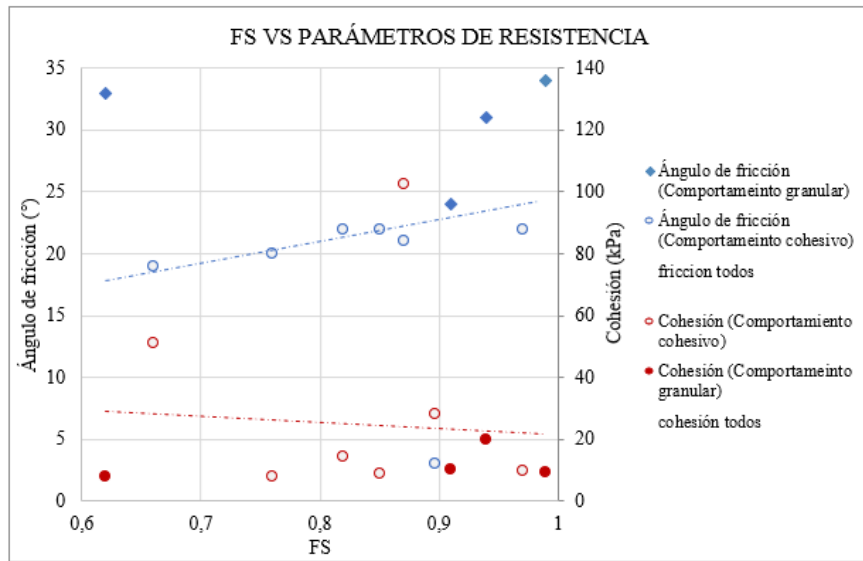
Fuente: Propia



Gráfica 16. FS contra índice de liquidez y consistencia

En la Gráfica 17, se presenta la variación entre el ángulo de fricción interna y la cohesión con respecto al FS, para los suelos cohesivos y granulares de origen residual. Se encontró una relación proporcional del FS con respecto al ángulo de fricción, en la cual el factor de seguridad se acerca a la unidad cuando el ángulo de fricción supera los 32° en suelos granulares y los 22° en suelos cohesivos. En el caso 17, donde el suelo es granular, para un ángulo de fricción de 33° , el factor de seguridad obtenido del análisis de estabilidad es de 0.62, pero se considera que el resultado está principalmente influenciado por la pendiente del talud, la cual es muy pronunciada y tiene un valor igual a 67° , por lo que se considera que este valor no se incluye dentro de la tendencia.

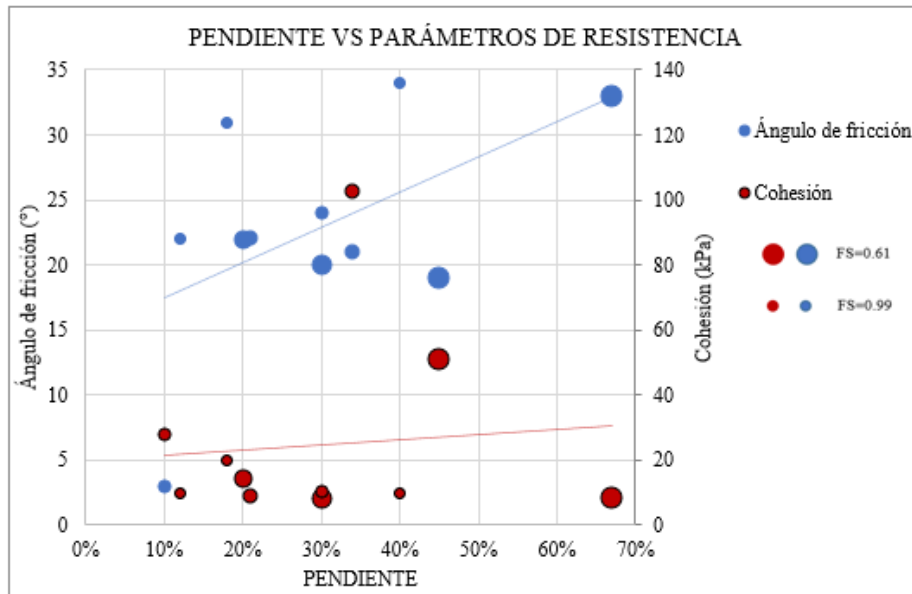
En cuanto a la influencia de la cohesión de los suelos residuales, esta tiene un comportamiento inverso al incremento del factor de seguridad, por lo que se infiere que los materiales con cohesiones bajas condicionan los taludes a favor de su estabilidad. La descripción anterior corresponde a la generalidad de los resultados, a pesar de la existencia de valores extremos alejados de la media o fuera de la tendencia; el menor factor de seguridad tiene una cohesión de 8 kPa y la máxima cohesión de 102 kPa está asociada un factor de seguridad de 0.88 que difiere del extremo inferior, por lo que se resalta que a pesar de las tendencias identificadas debe darse importancia al efecto conjunto de los factores condicionantes y detonantes identificados en cada caso, relacionados por ejemplo con los niveles freáticos y la acción antrópica .



Gráfica 17. Variación del factor de seguridad con los parámetros de resistencia en suelos residuales

Con el fin de evaluar la relación de los parámetros de resistencia con la pendiente del talud, junto con el factor de seguridad, en la Gráfica 18 se muestra el comportamiento de la cohesión en el eje derecho y del ángulo de fricción en el eje izquierdo, en función de la pendiente; los factores de seguridad se representan mediante el tamaño de los círculos.

Los taludes de la investigación compuestos por suelos residuales, en los cuales se presentó falla, tienen pendientes que varían en un rango del 10 % al 67%. No existe una correlación clara entre el FS y la pendiente del talud, sin embargo, en las pendientes que superan el 40%, se presentan los menores FS. De acuerdo con los resultados, la pendiente es directamente proporcional al ángulo de fricción y con respecto a la cohesión la correlación es muy baja. De acuerdo con lo anterior, se puede señalar que es común que los taludes con altas pendientes tengan una resistencia friccional igualmente alta.



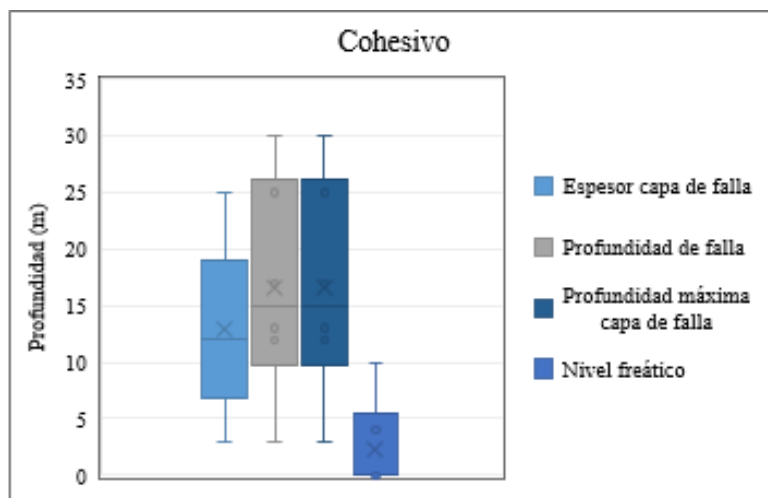
Gráfica 18. Variación de los parámetros de resistencia con la pendiente en suelos residuales

Los rangos de los parámetros de resistencia obtenidos en los suelos de comportamiento cohesivo, los cuales pueden asociarse a condiciones de inestabilidad, son muy amplios; materiales en los que la cohesión es superior a 102 kPa fue el medio de generación de una superficie de falla con un factor de seguridad menor que 0.87, del mismo modo se encontraron suelos con apenas 8 kPa de cohesión que generaron factores de seguridad de 0.76 y 0.85. Con respecto a los límites de consistencia, se considera que suelos en los que el índice de plasticidad sea superior al 12% pueden influir en la ocurrencia del deslizamiento.

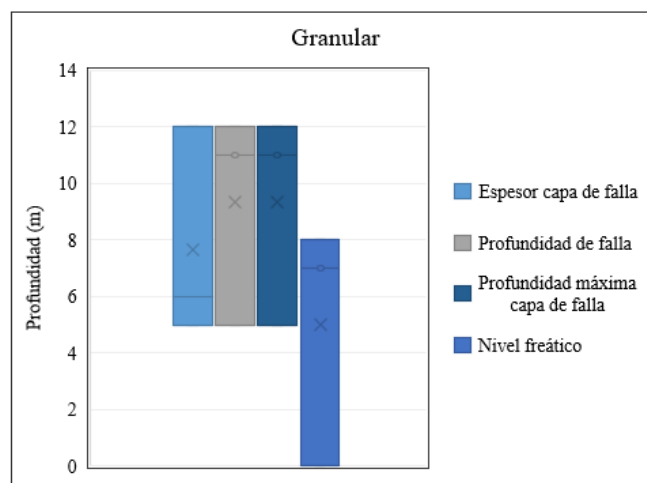
De acuerdo con lo anterior, es posible considerar un depósito residual cohesivo altamente inestable, en taludes con pendientes mayores que el 10% que tengan un índice de plasticidad superior al 12%, considerando que entre mayor sea la cohesión el factor de seguridad puede tener un valor más bajo.

Con respecto a los suelos residuales de comportamiento granular, se encontró un menor grado de inestabilidad, con FS que varía entre 0.91 y 0.99, sin considerar el resultado del caso 17 en donde el FS corresponde al 0.62 pero la pendiente es de 67°. Aunque los taludes con suelo granular pueden ser más estables, debe tenerse en cuenta que con ángulos de fricción de hasta el 34° se puede presentar falla y que el porcentaje de finos no se considera altamente influyente.

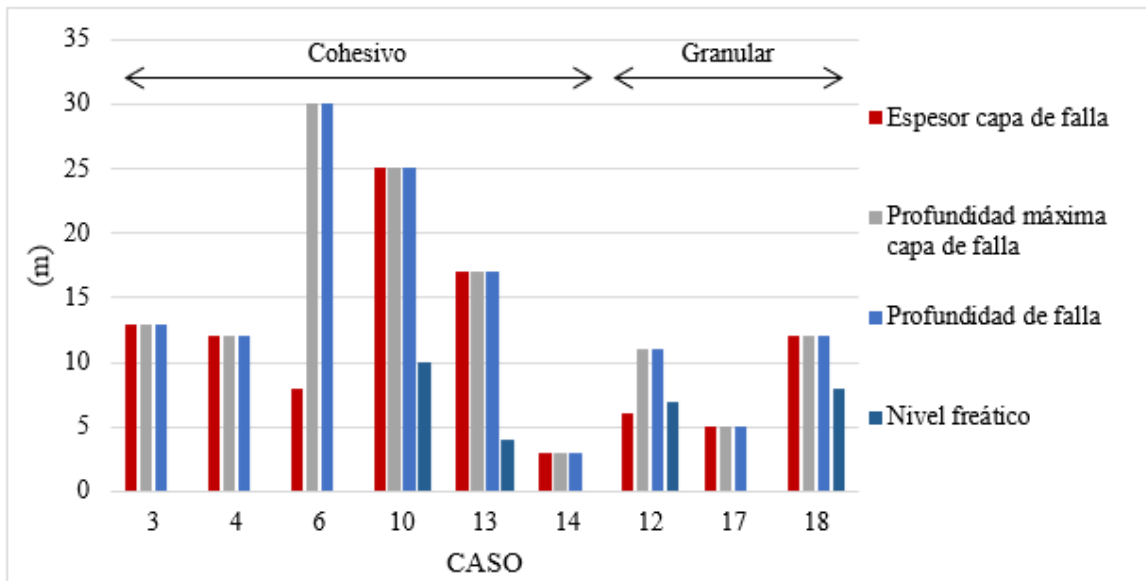
Del mismo modo que en los depósitos coluviales, se analizó el espesor y profundidad de la capa en donde se generó la falla, la profundidad máxima de la superficie de falla y el nivel freático, discriminando los resultados de acuerdo con el tipo de comportamiento, cohesivo o granular. En la Gráfica 19 se presenta mediante diagramas de cajas la variación en la magnitud de las dimensiones analizadas en los suelos residuales de comportamiento cohesivo y en la Gráfica 20 los de comportamiento granular. En la Gráfica 21 se presentan los resultados por caso, para ambos tipos de comportamiento.



Gráfica 19. Variación en profundidades y nivel freático, en suelos cohesivos



Gráfica 20. Variación en profundidades y nivel freático, en suelos granulares



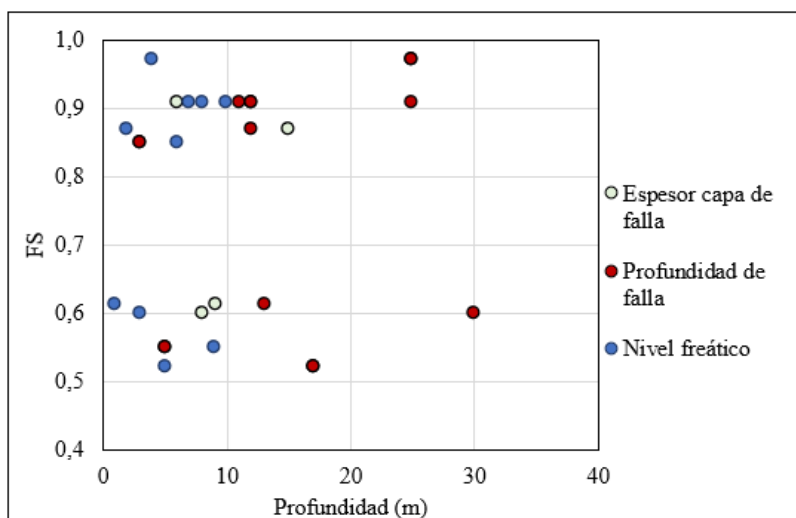
Gráfica 21. Profundidades y nivel freático por caso

Para los suelos residuales se presentan dos casos con capas de falla intermedias, el caso 12 y caso 6, en donde el espesor de la capa de falla es menor que la profundidad de la superficie de falla. Como se observa en la Gráfica 19, para los suelos cohesivos los espesores de la capa de falla varían entre 6 m y 25 m y la profundidad de la falla tiene valores entre 3 m y 35 m, esto refleja la existencia de las capas de falla intermedias. En los suelos granulares el espesor de la capa de falla varía entre 5 m y 12 m, al igual que la superficie de falla (Gráfica 20). Se encuentra además que los deslizamientos en suelos residuales de comportamiento cohesivo son más profundos que en los suelos granulares.

De la profundidad máxima de la capa de falla es posible deducir que en todos los casos la zona de contacto con el material subyacente, es el medio en que se genera la falla, por lo que se cumple que todas las barras grises de la Gráfica 21 tengan la misma altura de las barras de color azul claro.

En cuanto al nivel freático, se encontró una variación entre 0 m y 10 m para los depósitos cohesivos y entre 0 m y 8 m para los depósitos granulares, es decir que en todos los casos el nivel freático está por encima de la superficie de falla y en la mayoría de los casos el nivel freático se encontraba en superficie en el momento del deslizamiento. En la Gráfica 22 se presenta la variación del FS de cada caso de suelo coluvial con respecto a los parámetros geométricos definidos

para la falla y el nivel freático, los círculos vacíos representan los casos de comportamiento granular. Se encontró que el FS para los suelos residuales presenta una alta dispersión para las tres variables analizadas.

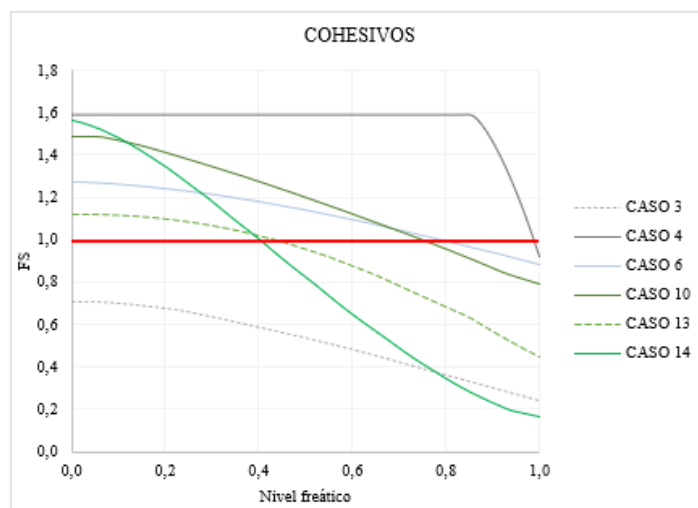


Gráfica 22. Variación del FS con respecto a al espesor de la capa de falla, profundidad de falla y nivel freático

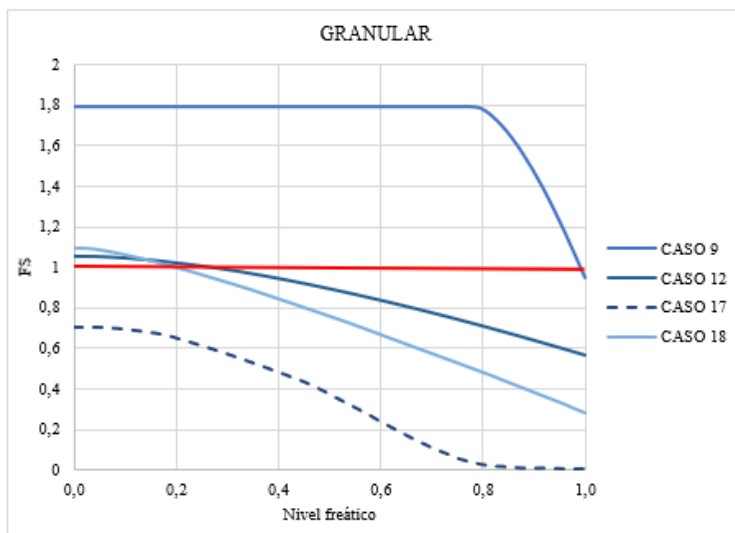
Con el fin de definir la influencia de la posición del nivel freático con respecto al FS, que no se refleja en la gráfica anterior, se realizó un análisis de sensibilidad para cada caso, del cual se obtuvieron curvas de FS contra la posición del nivel freático, considerando la variación de este último factor de 0 a 1, siendo 0 la profundidad máxima que puede alcanzar el nivel freático (correspondiente al contacto con la roca madre o la profundidad máxima de la capa de falla, dependiendo del perfil) y 1 la condición en la cual la lámina de agua se encuentra en superficie y el suelo se encuentra saturado.

De acuerdo con la Gráfica 23 se encontró que la profundidad relativa del nivel freático afecta de diferentes maneras la estabilidad en cada caso de suelo cohesivo, en el caso 3 la falla se presenta independientemente de la posición del nivel freático, mientras que en los casos 4, 6 y 10, la falla se genera cuando la posición del nivel freático esta próxima a saturar la totalidad del perfil, para los casos 4 y 14 el 40% de la capa saturada, desencadena el deslizamiento. Se observa además

que el comportamiento es similar en la mayoría de los casos: relativamente proporcional y decreciente. Para los casos en suelo granular que se presentan en la Gráfica 24, el caso 17 evidencia la condición más crítica, evidencian falla incluso en estado seco y FS muy bajos, los casos 12 y 18 tienen un comportamiento muy similar, y alcanzan la falla con el 20% de la capa de falla saturada. En los casos 3 y 9 (cohesivo y granular respectivamente), se encontró que el ascenso en el nivel freático a más del 90% de la altura total de la capa de falla no afecta el FS, manteniéndose constante prácticamente hasta completar la saturación, justo en donde alcanza la falla. (Gráfica 23 y Gráfica 24)

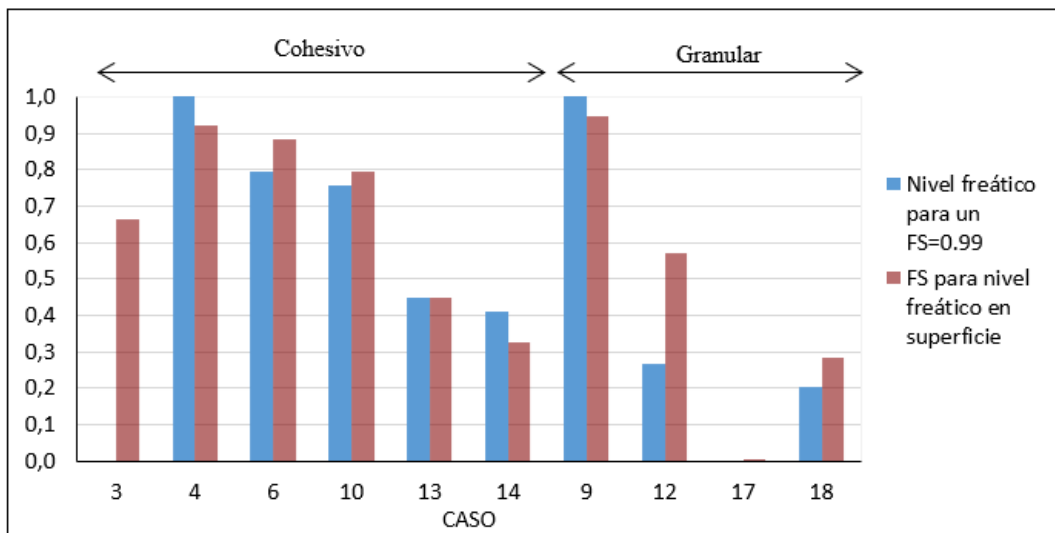


Gráfica 23. Variación del FS contra el nivel freático en los casos con suelos cohesivos



Gráfica 24. Variación del FS contra el nivel freático en los casos con suelos granulares

Para cada caso, en la Gráfica 25 se presenta el nivel del agua dentro de la capa de falla con el cual el talud alcanza un FS de 0.99 y el valor del FS obtenido cuando el nivel freático se encuentra en superficie. Aunque los resultados no son homogéneos en todos los casos, se encuentra que para los suelos residuales, en cualquier posición del nivel freático dentro de la capa susceptible al movimiento puede desarrollarse la superficie de falla, se encontró solo un caso cohesivo en el cual se presenta falla en condición seca, la para los demás presencia del agua es altamente significativa, a excepción del caso 17, para el cual se ratifica la dependencia de la pendiente del talud, ya que el nivel freático no afecta el resultado en términos de estabilidad.



Gráfica 25. Nivel freático requerido para la falla y FS con el nivel freático en superficie

Capítulo III. Metodología Propuesta para la determinación de la susceptibilidad incluyendo factores geotécnicos en su análisis

De acuerdo a lo descrito por Santacana (2001), el término susceptibilidad hace referencia a la predisposición del terreno a la ocurrencia de deslizamientos y no implica el aspecto temporal del fenómeno; en ese orden de ideas, para evaluar el grado de susceptibilidad del terreno frente a los deslizamientos, existen diversas aproximaciones basadas en su mayoría en la determinación de los factores que influyen en la aparición de las roturas o fallas, pero no se cuenta con el factor que evalúe los parámetros geotécnicos del suelo.

Con base en el análisis de los resultados obtenidos en cada uno de los casos de estudio seleccionados para la presente investigación, se demostró la relación entre el grado de inestabilidad de los taludes de estudio, compuestos por suelos residuales y suelos transportados de origen coluvial, con respecto a sus propiedades geotécnicas de resistencia y clasificación.

Para alcanzar el último objetivo específico de la investigación, se plantea una metodología que permite la determinación de la susceptibilidad del terreno a deslizamientos teniendo en cuenta la manera en que las propiedades geotécnicas evaluadas influyen en la estabilidad de un determinado talud. Para tal fin, se aplicó un método heurístico que permite la aplicación de pesos a factores condicionantes y el posterior cálculo de susceptibilidad. Se consideró además que el rango de valores propio de cada parámetro, determinado con base en la recopilación de información de los casos de estudio, se relaciona con una situación de inestabilidad en la que se presentó falla.

Dados los lineamientos de la investigación y los datos en los que se fundamentan los resultados, se enfatiza en la limitación del uso de esta metodología únicamente en zonas con suelos de tipo residual y coluvial, para escala 1:25000. Con el fin de facilitar la aplicación de la metodología a la escala seleccionada, no se consideran los parámetros correspondientes a la cohesión y al ángulo de fricción, ya que su inclusión requiere de la ejecución de ensayos de resistencia; incluir la programación de este tipo de ensayos podría limitar el uso de la metodología.

La metodología propuesta tiene en cuenta los aspectos más importantes de las metodologías existentes, mencionadas en el numeral 1.2.2 y consiste en las siguientes cinco etapas secuenciales:

1. Insumos básicos
2. Recopilación y análisis de información de referencia
3. Planeación y ejecución de exploración geotécnica complementaria
4. Caracterización geotécnica
5. Determinación de la susceptibilidad

A continuación se describe cada una de las etapas consideradas, así:

1. Definición de insumos básicos

El insumo básico recomendado para iniciar el proceso de zonificación de susceptibilidad consiste en la generación de un mapa base cartográfico de la zona de estudio georreferenciado con apoyo en un programa SIG, el cual se complementará con dos capas correspondientes a la información geológica y geomorfológica de la zona. En caso de que la zona cuente con unidades geológicas superficiales definidas previamente estas podrán ser utilizadas como insumo básico.

De acuerdo con la información geológica y geomorfológica, se desarrolla una capa de unidades geológicas superficiales y una capa de unidades geomorfológicas, ambas en formato ráster con pixeles del mismo tamaño. Mediante álgebra de mapas, se suman las dos capas de forma que la combinación de la información geológica y geomorfológica en cada píxel genere una nueva capa con unidades más detalladas, se tendrá para cada unidad sólo un tipo de geoforma y una caracterización geológica. Cada una de las unidades definidas debe clasificarse con el tipo de suelo, origen, litología, geoforma y pendiente media, esta información puede ser agregada al mapa como atributos de la capa.

Como insumo adicional se requiere de la generación y localización del inventario de deslizamientos para la zona de estudio.

2. Recopilación y análisis de información de la zona de estudio

Esta etapa consiste en la recopilación de la información geotécnica de los estudios de suelos realizados en el área de interés. Toda la información de referencia se analiza y organiza de forma que los parámetros geotécnicos disponibles asociados a su localización puedan incluirse como atributos a la capa de unidades. La información de referencia debe incluir los resultados de exploraciones directas y ensayos de laboratorio, en cuanto a las exploraciones indirectas, como ensayos geofísicos o ensayos de penetración con cono, se recomienda incluir solamente el perfil estratigráfico.

Como resultado de esta etapa se genera un perfil estratigráfico y una caracterización geotécnica preliminar para cada una de las unidades definidas en la etapa 1.

3. Planeación y ejecución de investigación del suelo complementario

A partir de la ubicación de las perforaciones de referencia en el mapa de zonificación, el cual cuenta con las unidades de análisis, se recomienda la planeación de un programa de investigación del subsuelo que complemente y verifique la información geotécnica de referencia.

Para ello se verifica la cobertura de perforaciones por cada unidad, en caso de que esta cuente con al menos una perforación de referencia se debe proponer una localización para la ejecución de una perforación mecánica con recuperación continua, en caso de que dentro del área de la unidad no se localice ninguna perforación de referencia, se recomienda proyectar las coordenadas de dos perforaciones mecánicas de recuperación continua. La ubicación de las perforaciones complementarias debe determinarse de forma que la distribución en la unidad sea óptima, dándose la mayor cobertura a la unidad. La profundidad de las perforaciones debe ser de mínimo 20 m y debe incluir el registro del nivel freático.

Puede complementarse la exploración geotécnica por unidad de análisis con la ejecución de CPTu o ensayos geofísicos. A partir de los resultados de estos ensayos de campo o de la información de referencia, se debe planear la extracción de al menos una muestra inalterada por estrato de suelo definido en el perfil geotécnico preliminar. Debe considerarse que de forma

simultánea a la perforación, al identificar cambios de material no previstos, se debe realizar la extracción de muestras adicionales.

Dentro de los ensayos que deben ejecutarse en las muestras extraídas se deben realizar como mínimo los siguientes ensayos:

- Humedad natural
- Límites de Atterberg
- Análisis granulométrico

Todas las actividades de esta etapa deben cumplir con las normas técnicas vigentes relacionadas con la correcta ejecución de ensayos de campo y de laboratorio.

4. Caracterización geotécnica

Posterior a obtención de los resultados de los ensayos de laboratorio y de campo, se verifica la validez de la información de referencia, y con los datos aceptados, se procede a realizar la caracterización geotécnica definitiva de cada unidad de estudio. Para este fin se incluye una capa denominada factores geotécnicos, que incluya dentro de sus atributos la humedad natural, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad y porcentaje de finos para cada una de las unidades definidas. Adicionalmente, se requiere de la definición del tipo de comportamiento del suelo, considerando los resultados de los ensayos de clasificación, este puede ser cohesivo o granular. La capa de factores geotécnicos debe incluir el nivel freático y los espesores de las capas identificadas en las perforaciones.

5. Definición de la susceptibilidad

Para cada una de las unidades que hacen parte de la zona de estudio, se asignan pesos ponderables para los factores condicionantes correspondientes a la pendiente (P_p), propiedades geotécnicas (P_{pg}) e inventario (P_i), la sumatoria de estos pesos corresponde al índice de

susceptibilidad de cada unidad (IS_{Unidad}), el cual se asocia a cuatro categorías muy alta, alta, media y baja, y tiene un FS equivalente. (Ver Ecuación (10) y la

Tabla 33).

Se aclara que los FS obtenidos en la investigación corresponden a valores entre 0.6 y 0.99, estos se consideran que están asociados a un nivel de amenaza alta y los FS menores que 0.6 se determina que hacen referencia a un nivel de amenaza muy alto. El FS con valor de 1.5 que establece el límite entre el nivel de susceptibilidad medio y bajo, se definió de acuerdo con las recomendaciones normativas y bibliográficas para una condición estable.

$$IS_{Unidad} = P_p + P_{pg} + P_i \quad (10)$$

Tabla 33. Pesos según el FS para cada categoría

Factor de seguridad	Categoría susceptibilidad	Pesos
< 0,6	Muy alta	1,1
0,6 - 0,99	Alta	1
1 - 1,5	Media	0,5
> 1,5	Baja	0

Fuente: Propia

Los pesos ponderados propuestos para cada uno de los factores condicionantes tenidos en cuenta para el cálculo del índice de susceptibilidad (Pendiente, Propiedades geotécnicas e Inventario), tienen una magnitud variable entre 0 y 1.1 y fueron determinados con base en los rangos obtenidos en la Tabla 28 y la Tabla 30, sin tener en cuenta los valores atípicos mencionados en el numeral 0. Para cada tipo de suelo y cada factor condicionante, el rango de valores obtenido de los casos de estudio de parámetros geotécnicos, constituyen un escenario de alta susceptibilidad, ya que para estos valores fue registrado el evento de falla, para este rango se asignó un peso de 1.0, teniendo en cuenta la variación del parámetro con respecto al FS estudiado en los numerales 0 y 0, para valores del parámetro que superen el rango a favor de un FS de menor magnitud, la susceptibilidad se considera muy alta y el peso asignado corresponde a 1.1, en el caso en que los valores del parámetro se encuentren por fuera del rango a favor de un FS de mayor magnitud, es decir una condición de estabilidad, la susceptibilidad será media o baja. Para la categoría de susceptibilidad media, en función de la tendencia del parámetro con respecto al FS, se estableció un

rango considerando una desviación estándar del conjunto de datos y se asignó un peso de 0.5, para valores mayores o menores, de acuerdo con la tendencia, la susceptibilidad es baja y el peso asignado corresponde a 0.

En la Tabla 34 se presenta la tendencia proporcional o inversa de cada parámetro estudiado en la investigación. Los campos vacíos (-) indican la falta de información relacionada con el parámetro geotécnico en cada tipo de suelo o que no se encontró una correlación del parámetro con respecto al FS.

Tabla 34. Tendencia de cada parámetro geotécnico estudiado con respecto al factor de seguridad

Parámetros geotécnicos	Suelo Coluvial	Suelo Residual
Humedad	Inversamente proporcional	Inversamente proporcional
LL	-	Proporcional
LP	-	Inversamente proporcional
IP	Inversamente proporcional	Inversamente proporcional
% Finos	Inversamente proporcional	-
c	Inversamente proporcional	Inversamente proporcional
φ	Inversamente proporcional	Proporcional

Fuente: Propia

A continuación, para cada uno de los factores condicionantes, se definen los pesos correspondientes a cada rango de valores definido con base en los resultados de la investigación, para el suelo de tipo coluvial, considerando el tipo de comportamiento.

Tabla 35. Pesos asignados a pendientes de suelos coluviales

Tipo de suelo	Comportamiento	Rango de valores (%)	Peso
Coluvial	cohesivo	> 38	1,1
		20 - 38	1
		14 - 20	0,5
		< 14	0
	Granular	> 36	1,1
		29 - 36	1

Tipo de suelo	Comportamiento	Rango de valores (%)	Peso
		26 - 29	0,5
		< 26	0

Fuente: Propia

Tabla 36. Pesos para las propiedades índices de suelos coluviales

Rango de valores (%)			Peso
Humedad	Índice de plasticidad	Porcentaje de finos	
> 32	> 26,5	> 91	1,1
11 - 32	25 - 26,5	13 - 91	1
5 - 11	24,4 - 25	6 - 13	0,5
< 11	< 24,4	< 6	0

Fuente: Propia

A continuación, para cada uno de los factores condicionantes, se definen los pesos correspondientes a cada rango de valores definido con base en los resultados de la investigación, para el suelo de tipo residual, considerando el tipo de comportamiento.

Tabla 37. Pesos asignados a pendientes de suelo residual

Tipo de suelo	Comportamiento	Rango de valores (%)	Peso
Residual	cohesivo	> 45	1,1
		10 - 45	1
		5 - 10	0,5
		< 5	0
	Granular	> 40	1,1
		18 - 40	1
		9 - 18	0,5
		< 9	0

Fuente: Propia

Tabla 38. Pesos para las propiedades índices de suelos residuales

Rango de valores (%)				Peso
Humedad	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	
> 24	< 32	> 30	< 12	1,1
6 - 24	32 - 71	19 - 30	12 - 42	1
3-6	71 - 82	15 - 19	42 - 50	0,5
0-3	> 82	< 15	> 50	0

Fuente: Propia

Además de los pesos definidos en las tablas anteriores, se tuvo en cuenta el inventario como factor condicionante, el peso fue asignado en función de la ausencia o existencia de eventos pasados en cada una de las unidades; si la unidad cuenta con al menos un deslizamiento, el peso asociado a este factor será de 1.0, si en la unidad no se han presentado movimientos de este tipo, el peso para el factor es de 0.

La Ecuación (11) corresponde a la expresión definida para calcular el índice de susceptibilidad en los suelos coluviales.

$$(IS_{Unidad})_{coluvial} = (P_p)_c + (P_{pg})_c + (P_i)_c \quad (11)$$

Donde

$(P_p)_c$: Peso para la pendiente de suelo coluvial según la Tabla 35

$(P_i)_c$: Peso por inventario, 1 si hay deslizamiento 0 si no hay.

El segundo término de la Ecuación (11) se calcula como sigue:

$$(P_{pg})_c = \frac{1}{3} (P_w + P_{IP} + P_F) \quad (12)$$

Donde,

P_w , P_{IP} y P_F : Pesos para las propiedades geotécnicas básicas en suelo coluviales, correspondientes a humedad, índice de plasticidad y porcentaje de finos, los cuales se presentan en la Tabla 36.

En cuanto a los suelos residuales, la Ecuación (13) corresponde a la expresión definida para calcular el índice de susceptibilidad en los suelos residuales

$$(IS_{Unidad})_{residual} = (P_p)_r + (P_{pg})_r + (P_i)_r \quad (13)$$

Donde

$(P_p)_r$: Peso para la pendiente según la Tabla 37

$(P_i)_r$: Peso por inventario, 1 si hay deslizamiento 0 si no hay.

El segundo término de la Ecuación (13) se calcula como sigue:

$$(P_{pg})_r = \frac{1}{4} (P_w + P_{LL} + P_{LP} + P_{IP}) \quad (14)$$

Donde,

P_w , P_{LL} , P_{LP} y P_{IP} : Pesos para las propiedades geotécnicas básicas en suelos residuales, correspondientes a humedad, límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, los cuales se presentan en la Tabla 38.

Para cada una de las unidades de estudio se calcula el índice de susceptibilidad IS usando las Ecuaciones (11) y (13), de acuerdo con el valor obtenido, la unidad se podrá clasificar en cuatro diferentes niveles de susceptibilidad, como se muestra en la Tabla 39.

Tabla 39. Categorización de la susceptibilidad a deslizamientos para suelos residuales y cohesivos de acuerdo con el índice de susceptibilidad

Índice de susceptibilidad	Categoría de susceptibilidad
2,7 - 3,3	Muy alta
1,3 - 2,7	Alta
0 - 1,3	Media
0	Baja

Fuente: Propia

Con el fin de ilustrar la aplicación de la metodología, se presenta a continuación un ejemplo sencillo, tomando como base la investigación geotécnica realizada por Gallardo Amaya, Guerrero Barbosa, & Macgregor Torrado (2013), para la estabilización de laderas en el barrio San Fermín, municipio de Ocaña, departamento de Norte de Santander (Colombia). Se realizan algunas suposiciones de acuerdo con los datos faltantes. Para efectos del ejemplo no se generan mapas SIG, en su lugar se realiza el análisis de susceptibilidad para una unidad del mapa idealizado según las recomendaciones de la metodología. A continuación se detallan cada uno de los pasos.

1. Definición de insumos básicos

Pese a que no se realiza para la ilustración del ejemplo, el primer paso es generar un mapa georreferenciado con ayuda de sistemas de información geográfica en donde se localiza la zona de interés, y se definen las condiciones geológicas y geomorfológicas del sitio:

Geología: Se consultó la Carta Cronoestratigráfica de Colombia, la cual arrojó que en la región de Ocaña se encuentran dos formaciones importantes: una de carácter sedimentario, conocida como la Formación Algodonal, perteneciente al Terciario, conformada por conglomerados poco consolidados, arcillolitas y limolitas, y la otra de carácter ígneo conocida como el Complejo intrusivo-extrusivo (Jci), que forma parte del complejo ígneo, metamórfico denominado “Macizo Santander” e incluye rocas ígneas del Jurásico-Triásico (entre 144 y 245 Ma). Este último constituido por una fase intrusiva cuya composición predominante es cuarzo - monzonita, pórfidos riolíticos, diques básicos de diabasas y basalto;

también incluye material piroclástico con presencia de toba, brechas y aglomerado. (Gallardo Amaya et al., 2013, p.3)

Geomorfología: La geomorfología del lugar corresponde a cerros moderadamente empinados de forma irregular y ondulada asociados a sistemas cordilleranos. La ladera del cerro es bastante empinada, con pendientes entre 45 y 65°. La ladera presenta microrrelieves, una parte por la erosión natural y otra por la intensa y desordenada urbanización del lugar. Generalmente, la tendencia de inclinación es 37° N - NW. (Gallardo Amaya et al., 2013, p.3)

A partir de la información anterior, se genera un mapa de unidades geológicas superficiales y geomorfológicas en formato ráster y por cada píxel se combina la información de cada capa a fin de generar un mapa más discriminado. En la Figura 9 (a) se presenta al mapa geológico de un sector del municipio de Ocaña a escala 1:25000, tomado del atlas geológico generado por el Servicio Geológico Colombiano, en el cual se aprecia la existencia de dos unidades geológicas denominadas para este ejemplo UG-1 y UG-2. En la Figura 9 (b) se presenta el mapa geomorfológico a la misma escala, del cual se obtuvieron 2 unidades. De la superposición de los dos mapas, en la Figura 9 (c) se presentan las unidades básicas definidas para el análisis, U1, U2, U3 y U4.

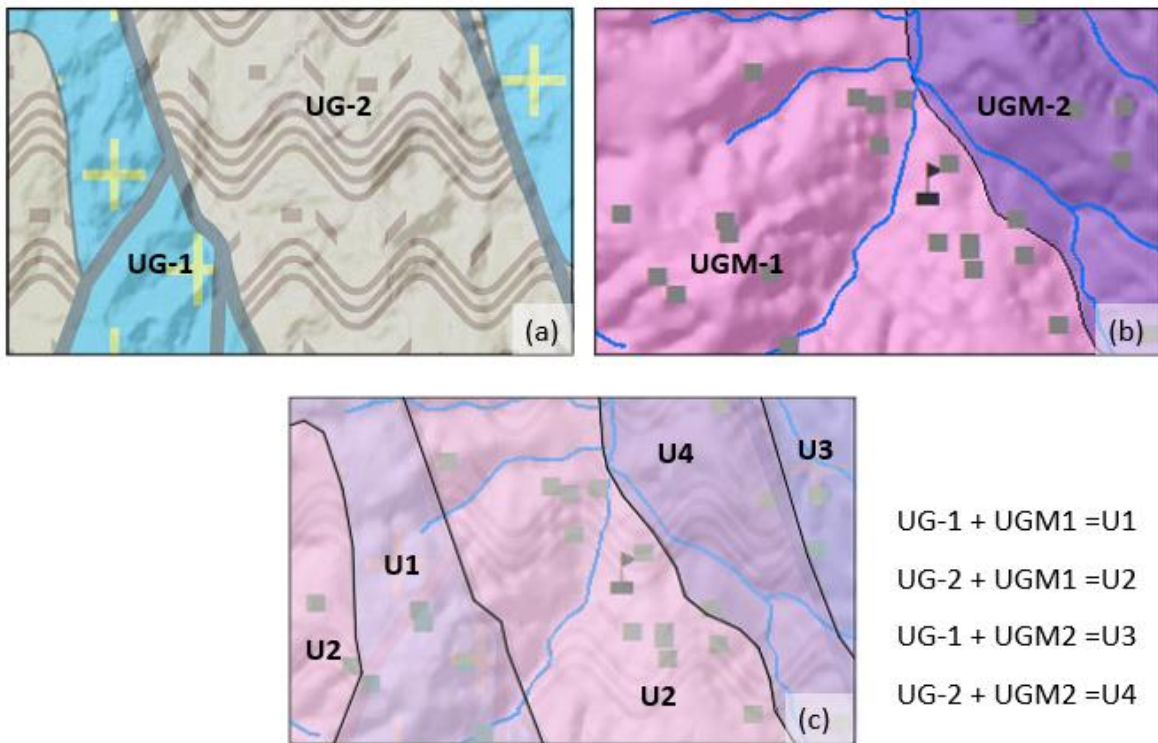


Figura 9. Definición de unidades

Para cada píxel se asigna la información correspondiente a su unidad, pendiente, tipo de suelo y la demás información recomendada en la metodología o que se considera de interés para la clasificación. En la siguiente figura se presenta el mapa de pendientes generado en la investigación de referencia para la zona de estudio

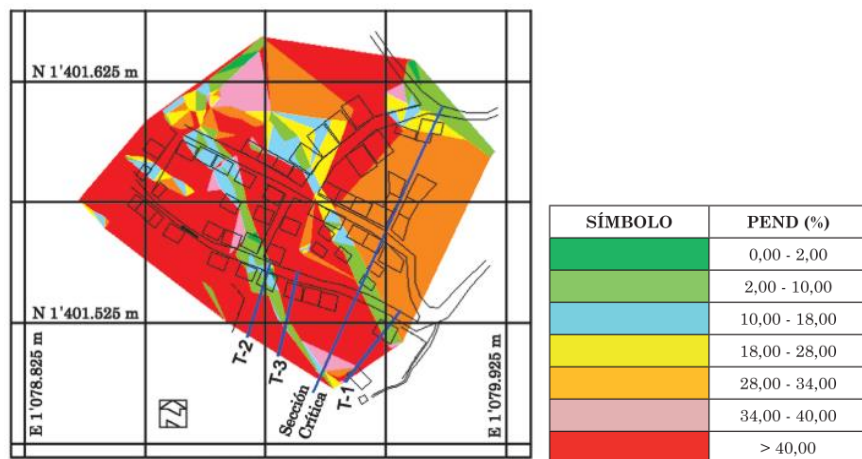


Figura 10. Mapa de pendientes

Se genera una capa del mapa con las coordenadas de los eventos históricos de deslizamientos, se supone la distribución de que se muestra en la Figura 11.

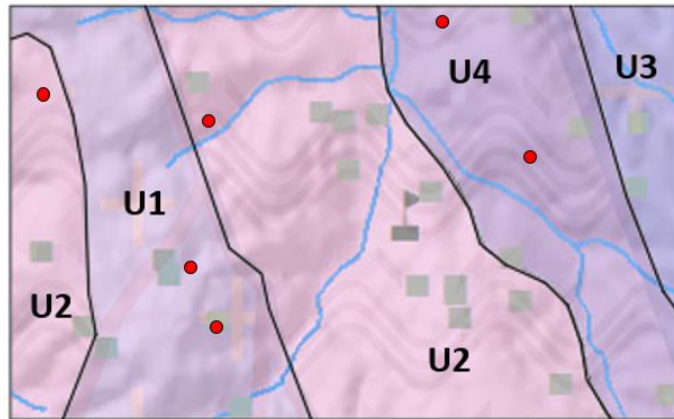


Figura 11. Inventario de deslizamientos

2. Recopilación y análisis de información de referencia

Se recopila toda la información geotécnica de estudios realizados en la zona, suponiendo que se encontró al menos una perforación en cada una de las unidades definidas. Los registros de campo y laboratorio son procesados y organizados de forma que para cada unidad se define un perfil estratigráfico preliminar.

3. Planeación y ejecución de exploración geotécnica complementaria

Para cada una de las unidades se programa una perforación mecánica de 30 m de profundidad con recuperación continua maximizando la cobertura con respecto a la perforación de referencia. Se ejecutan las perforaciones, con un ingeniero encargado que genera un registro de campo detallado. Se extrae una muestra por cada capa del perfil estratigráfico preliminar y se realizan ensayos de caracterización.

4. Caracterización geotécnica

De acuerdo con los resultados de los ensayos de laboratorio y a partir de los registros de campo se desarrolló el perfil estratigráfico del suelo para cada una de las unidades definidas. En la Tabla 40 se presenta el perfil definido para la unidad U1.

Tabla 40. Perfil estratigráfico

Estrato	Descripción litológica
Suelo residual	Suelo arcilloso color pardo oscuro con inclusiones de materia orgánica y raíces; en menor proporción clastos de la roca parental. Espesor relativamente homogéneo de 1.0 a 2.5 m.
Roca ígnea	Roca cristalina con textura fanerítica, donde se reconocen a simple vista sus minerales primarios, como la biotita, cuarzo y plagioclasa, pero de forma irregular. Presenta pequeñas fracturas rellenas de silicatos. El grado de meteorización que la afecta es regular a alto. No se observan diaclasas ni fallas que representen algún problema de tipo estructural para el macizo rocoso.

Fuente: (Gallardo Amaya et al., 2013)

En la siguiente tabla se presentan los resultados de los ensayos de clasificación (Los límites de Atterberg fueron asumidos según el tipo de material descrito):

Tabla 41. Propiedades índices del suelo residual

Humedad natural	LL (%)	LP (%)	IP(%)
19	35	10	25

De acuerdo con lo anterior el suelo residual ubicado sobre la roca es de comportamiento cohesivo.

5. Determinación de la susceptibilidad

Con el fin de simplificar el ejemplo para la evaluación de la susceptibilidad, se selecciona un píxel de la unidad U1 y se considera que este se encuentra ubicado en la zona de color

rojo de la Figura 10. La evaluación se realiza mediante el cálculo del índice de susceptibilidad para suelos residuales cohesivos, usando la Ecuación (13). Cada uno de los pesos se define como se muestra a continuación.

Peso para la pendiente

Tabla 42. Pesos asignados a pendientes de suelo residual

Tipo de suelo	Comportamiento	Rango de valores (%)	Peso
Residual	cohesivo	> 45	1,1
		10 - 45	1
		5 - 10	0,5
		< 5	0
	Granular	> 40	1,1
		18 - 40	1
		9 - 18	0,5
		< 9	0

Fuente: Propia

$$(P_p)_r = 1.0$$

Peso por inventario

Ya que en la unidad U1 se localizaron eventos de deslizamientos previos,

$$(P_i)_r = 1.0$$

Peso por propiedades geotécnicas

Los pesos para las propiedades geotécnicas definidas en la metodología se seleccionan de acuerdo con la Tabla 38.

Tabla 43. Pesos para las propiedades índices de suelos residuales

Rango de valores (%)				Peso
Humedad	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	
> 24	< 32	> 30	< 12	1,1
6 - 24	32 - 71	19 - 30	12 - 42	1
3-6	71 - 82	15 - 19	42 - 50	0,5
0-3	> 82	< 15	> 50	0

Fuente: Propia

El peso para la humedad, límite líquido e índice de plasticidad es de 1.0, para el límite plástico el peso equivale a 0.

De acuerdo con lo anterior, y teniendo en cuenta la Ecuación (14), se calcula el peso de las propiedades geotécnicas como sigue

$$(P_{pg})_r = \frac{1}{4} (1 + 1 + 0 + 1) = 0.75 \quad (15)$$

Por lo tanto, el índice de susceptibilidad para para unidad U1 es igual a:

$$(IS_{Unidad})_{residual} = 1 + 0.75 + 1 + 0 = 2.75$$

De acuerdo con el resultado y la Tabla 39, la susceptibilidad en la unidad evaluada se clasifica como *Muy Alta*, ya que el índice de susceptibilidad se encuentra 2.7 y 3.3.

A pesar de que algunos de los parámetros dispuestos en el ejemplo fueron supuestos, se menciona que en la investigación realizada por Gallardo Amaya et al. (2013), el resultado del análisis de estabilidad realizado en la zona de estudio mediante la aplicación de un método determinista a escala local, arrojó un FS inferior a 0.72, luego se esperaba que la susceptibilidad calculada con la metodología propuesta en esta investigación se categorizara como muy alta, tal como se presenta.

Conclusiones

Teniendo en cuenta los análisis ejecutados, en esta investigación se realizaron satisfactoriamente 18 estudios de caso, para un total de 20 análisis de estabilidad de taludes, en los cuales se verificaron superficies de falla, tipos de suelo y parámetros geotécnicos asignados en cada caso, definiendo así la influencia que tienen algunos de ellos (Φ y C) y ciertas propiedades índice (límites de consistencia y granulometría) en la ocurrencia de los deslizamientos.

Se encontró que en todos los casos de estudio, la modelación por elementos finitos ofrece resultados similares a los encontrados por el análisis de estabilidad, usando el método del equilibrio límite, de los cuales se obtuvieron factores de seguridad asociados a condición de falla, con magnitudes menores que 1 que incluso alcanzaron valores cercanos a 0.6.

Todos los parámetros geotécnicos fueron evaluados con respecto al FS con el fin de inferir la relación entre su magnitud y la estabilidad del terreno. Como resultado se encontró que la variación de las propiedades índice y las propiedades de resistencia tienen diferentes comportamientos con respecto al origen del suelo.

Para los suelos coluviales, se determinó que el FS tiene mayores valores (con un máximo en 0.99), si sus propiedades índices reflejan humedades bajas, un índice de plasticidad bajo y un bajo porcentaje de finos, en relación a esta premisa se puede establecer que los materiales de comportamiento granular tienden a ser más estables, lo cual puede definirse con una alta similitud del análisis de la cohesión de los materiales; sin embargo, con respecto a los valores obtenidos en el ángulo de fricción, la tendencia es opuesta a la esperada, debido a que el incremento en el FS se da con la disminución del ángulo de fricción, lo que indica que pese a que el comportamiento cohesivo sea más inestable, el incremento en el ángulo de fricción contribuye a la inestabilidad, esto puede interpretarse mediante la consideración de que la fracción de comportamiento cohesivo de los suelos coluviales gobierna el mecanismo de falla del talud.

En cuanto a los suelos residuales, las propiedades índice evaluadas exhibieron diferentes manifestaciones. Los menores FS, es decir la situación de mayor inestabilidad, se presentan cuando el índice de plasticidad tiene menores magnitudes, mientras que el comportamiento es inverso si se tiene en cuenta la humedad natural y el índice de plasticidad. Con respecto a las propiedades

geotécnicas de resistencia, la tendencia en la distribución de los datos indica que los suelos residuales de comportamiento cohesivo son más inestables que los suelos residuales de comportamiento granular; en todos los casos, cohesiones bajas y ángulos de fricción altos, están asociados con los FS de mayor magnitud.

En cuanto a la pendiente media del terreno en la zona de falla, la cual fue comparada con el FS para todos los tipos de suelo; como resultado se encontró que la pendiente de los taludes conformados en suelos coluviales, no se correlaciona con la estabilidad, sin embargo, se definieron los límites para los cuales el evento de falla ocurrió, entre el 20% y el 38%. En los suelos residuales, la relación es inversamente proporcional, el FS aumenta si la pendiente disminuye.

Teniendo en cuenta los resultados del análisis de estabilidad en cada caso de estudio, se encontró que la variación en el nivel freático establece el detonante más común en los deslizamientos, influyendo directamente en la magnitud del FS. Factores asociados al espesor del suelo se consideran igualmente influyentes, la presencia de capas delgadas en todos los casos en donde fueron identificadas, constituyeron el medio en el cual se desarrolló la superficie de falla y se alcanzaron los esfuerzos más altos.

Se encontró que la profundidad de la superficie de falla por lo general corresponde al espesor de la capa de falla ya que en la mayoría de los casos se trata de la capa superficial. La profundidad de la superficie de falla alcanzó en la mayoría de los casos la zona de contacto con el material subyacente de mayor rigidez. De acuerdo con el resultado de los casos de estudio, los deslizamientos no pueden considerarse superficiales ni profundos, debido a que la profundidad de la superficie de falla en las investigaciones de referencia varía entre 3 m y 35 m, sin embargo, se observa que los deslizamientos en suelos cohesivos fueron más profundos que los presentados en suelos granulares.

Del análisis de variación del nivel freático, se encontró que las profundidades pueden variar definiendo una condición seca o saturada y que el FS no exhibe una correlación con el nivel freático. Para los suelos coluviales, la posición del nivel freático por encima del 50% del espesor de suelo potencialmente saturado (entre el contacto impermeable y la superficie) establece en promedio una condición en la cual se puede desencadenar un deslizamiento. Para los suelos residuales el comportamiento del nivel freático con respecto al factor de seguridad no puede considerarse constante con respecto al total de casos, sin embargo, el deslizamiento se presenta en

promedio cuando el 75% de la capa de falla se satura en suelos cohesivos y 40% en suelos residuales. En los suelos coluviales el nivel freático identificado en los casos de estudio es en promedio más profundo que en suelos residuales. Se resalta la facilidad con que el incremento del nivel freático puede desencadenar fácilmente la falla en suelos cohesivos y granulares de origen residual o coluvial.

Se ratificó la importancia de establecer adecuadamente la estratigrafía del medio, los cambios de rigidez y la posición del nivel freático como parte de un análisis de susceptibilidad al deslizamiento. Sin embargo, los resultados no evidencian el mismo comportamiento en todos los casos y la definición de estos parámetros implicaría la ejecución de estudios detallados, estos factores limitan el uso de los resultados obtenidos en la metodología propuesta en el capítulo 3.

Es importante resaltar que factores como estratos delgados de resistencia baja, no pueden ser identificados durante el análisis de susceptibilidad y amenaza a escala regional, pese a su importancia en el condicionamiento del deslizamiento. Los espesores de suelo son determinados indirectamente o supuestos, por lo que existe una alta probabilidad de pasar por alto factores detonantes que determinan el grado de susceptibilidad u obtener resultados equívocos.

La localización del nivel freático se establece como un factor altamente influyente en la generación de la falla de la mayoría de los casos estudiados, por lo tanto, se considera que la evaluación de la permeabilidad y la respuesta hidrológica del suelo frente a los procesos de infiltración y flujo de agua subterránea, entre otros, es indispensable en el análisis de susceptibilidad, sin embargo este tipo de parámetros e información no hace parte de las estudios de referencia, generando una limitación de la presente investigación. Esto se podría mejorar con la realización de más investigaciones en el tema, en las que se podrían ampliar los criterios para la determinación de susceptibilidad, incluyendo aspectos como el análisis de la influencia del agua; comportamiento en otro tipo de suelos, análisis de rigidez de las capas por donde se produce la falla, inclusión de más parámetros geotécnicos, entre otros aspectos que podrían mejorar optimizar la metodología planteada.

De manera general, los resultados encontrados permiten fortalecer el juicio de experto, en el sentido de que se puede inferir el nivel o grado de susceptibilidad al deslizamiento de un suelo coluvial y residual, a partir del conocimiento de parámetros básicos geotécnicos como la cohesión, el ángulo de fricción, límites de consistencia y porcentaje de finos. Esta identificación de la

influencia de los parámetros geotécnicos en la estabilidad, permitió generar una metodología que coadyuva a la interpretación del nivel de amenaza de este tipo de materiales a la ocurrencia de movimientos en masa, facilitando la caracterización de las zonas de riesgo que vulneran la integridad de la infraestructura y de la población circundante.

Con base en las metodologías de zonificación de susceptibilidad existentes, a los resultados de diferentes estudios realizados en el país, y considerando que lo encontrado en la investigación revela la relación directa del FS con los parámetros geotécnicos, se determinó darle una mayor importancia a la exploración del subsuelo y la ejecución de ensayos de laboratorio, no solo para las escalas muy detalladas de zonificación, ni únicamente para la caracterización general de las unidades geológicas del área de estudio.

La metodología generada describe el proceso secuencial desde la generación de los insumos básicos, hasta la determinación de los niveles de susceptibilidad para las unidades de estudio, con recomendaciones en el uso de una plataforma fundamentada en sistemas de información geográfica, exploraciones del subsuelo y caracterización geotécnica.

Dar continuidad al estudio de la susceptibilidad frente a la variación de las propiedades geotécnicas del suelo, se considera indispensable. La presente investigación se limita por el volumen de información recolectada; la adición de casos de estudio, que incluyan además casos en condición de estabilidad, pueden contribuir a mejorar la metodología, permitiendo la aplicación de métodos más complejos en la etapa de definición de la susceptibilidad, como un método estadístico multivariado que reduzcan el grado de incertidumbre, y que adicionalmente logre definir la tendencia de los parámetros geotécnicos para FS mayores que 1, esto facilitaría la definición de los niveles de susceptibilidad medio y bajo.

En virtud de lo anterior, a partir de los datos obtenidos, se invita a fortalecer la caracterización de la amenaza y/o susceptibilidad, por lo cual se ponen a disposición los análisis y resultados para que se considere a bien, incluir aspectos geotécnicos en la metodología de evaluación que realiza la Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa a Escala 1:25.000 del Servicio Geológico Colombiano (SGC).

Se recomienda incluir como parte de la metodología actual del SGC, específicamente en lo referente a la zonificación de susceptibilidad, en la primera etapa correspondiente a insumos, la

generación de una capa ráster con los factores geotécnicos, que pueda ser considerada en la aplicación del método de pesos de evidencia, y por ende, un término exclusivo en la expresión utilizada para el Índice de Susceptibilidad al Deslizamiento (LSI).

Bibliografía

Aguilar, O., y Zuñiga, C. (2015). Análisis comparativo de estabilidad de taludes mediante los métodos de equilibrio limite aplicado a taludes o laderas aledañas al Cerro de la Popa, casco urbano de Cartagena. [Archivo PDF]. Repositorio Universidad de Cartagena. <http://hdl.handle.net/11227/2089>

Almaguer, Y. R. (2013). Evaluación de Susceptibilidad por Deslizamientos en un Sector del Municipio Moa Aplicando Métodos Geomorfológicos y Estadísticos. [Archivo PDF]. Red Cubana de la Ciencia. http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2013_Almaguer_GEO10-O3.pdf.

Alzate, R. (2005). Estabilidad de Taludes con Aplicación en Zonas Húmedas Tropicales. Colombia: Universidad Tecnológica del Choco.

Anderson M, y Holcombe E. (2013). Reducción del Riesgo de Deslizamientos de Acuerdo con la Comunidad. Sonideas, Ed. doi: 10.1596/978-0-8213-9456-4

Arias, B. (2012). Deslizamientos en Taludes Inducidos por Altas Precipitaciones en Vías Intermunicipales en Colombia. [Archivo PDF]. Repositorio Universidad Libre. <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7116/AriasTorresBenjamin2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Avila, G. C. (2016). Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. S. G. Colombiano, Ed. https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/1642_Guia-Methodologica-27-07-2016-SinGuias.pdf

Ayberk, K. (2016). Stability assessment of high-steep cut slope debris on a landslide (Gumushane, NE Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75, 89-99. doi:10.1007/s10064-015-0753-6

Baczynski, N. R. P., Sheppard, I. K., Smith, K. J., Simbina, P., y Sakail, R. (2008). Toppling Slope Failure: Predicted Versus Actual, Ok Tedi, Papua New Guinea. *Proceedings of the First Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium*, 419–431. doi:10.36487/ACG_repo/808_10

Barla, G., Antolini, F., y Barla, M. (2013). Slope stabilization in difficult conditions: The case study

of a debris slide in NW Italian Alps. *Landslides*, 10(3), 343–355. doi:10.1007/s10346-013-0396-2.

BAGG Engineers. (2010). GEOLOGIC AND GEOTECHNICAL INVESTIGATION AND SLOPE STABILITY ANALYSES PROPOSED COYOTE HIGHLANDS DEVELOPMENT SANTA CLARA COUNTY, CALIFORNIA. Bay Area Geotechnical Group Engineers

BAGG Engineers. (2016). GEOTECHNICAL ENGINEERING INVESTIGATION NEW 2-STORY DATA CENTER BUILDING 2895 NORTHWESTERN PARKWAY SANTA CLARA, CALIFORNIA. Bay Area Geotechnical Group Engineers

Bednarczyk, Z. (2018). Identification of flysch landslide triggers using conventional and ‘nearly real-time’ monitoring methods – An example from the Carpathian Mountains, Poland. *Engineering Geology*, 244, 41–56. doi: 10.1016/j.enggeo.2018.07.012

Bisson, A., Cola, S., Tessari, G., y Floris, M. (2015). Floating Anchors in Landslide Stabilization The Cortiana Case in NorthEastern Italy. *Engineering Geology for Society and Territory*, 2, 2083-2087. doi: /10.1007/978-3-319-09057-3_372

Bojorque, J. (2011). Métodos para el análisis de la estabilidad de pendientes. [Archivo PDF]. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/299657050>.

Borda, T. F. (2015). Los deslizamientos de la cuenca baja del Río Darro (Granada, España). *GEOGACETA*, 103-106. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5159222>

Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design International* (5a ed.). Nueva York: MacGraw-Hill.

Bru, G., Fernández, J., García, J., Herrera, G., y Fernánde, J. (2015). 3D Stability Analysis of the Portalet Landslide Using Finite Element Method. *Engineering Geology for Society and Territory*, 2, 1519-1524. doi: 10.1007/978-3-319-09057-3_269

Cabrera, T. (2007). Características geotécnicas de los suelos residuales del batolito de la Cordillera de la Costa. [Archivo PDF]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104554>.

Calderón, Y. (2007). Movimientos en masa en la región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. [Archivo PDF]. Servicio Nacional de Geología y Minería. <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/2792>

Campos, F. (2014). Susceptibilidad de remociones en masa en Cuenca las Zorras, afectada por catástrofe incendiaria, comuna de Valparaíso. [Archivo PDF]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/134977/Susceptibilidad-de-remociones-en-masa-en-cuenca-Las-Zorras-afectada-por-catastrofe-incendiaria.pdf;sequence=1>

Castillo, M., y Redolledo, S. (2018). Análisis de propiedades geotécnicas de algunas rocas comunes en Chile. [Archivo PDF]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/169948/An%C3%A1lisis-de-propiedades-geot%C3%A9nicas-de-algunas-rocas-comunes-en-Chile.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

CEPAL. (2014). Manual para la Evaluación de Desastres. [Archivo PDF]. Repositorio Comisión Económica para América Latina y el Caribe. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/35894/1/S2013806_es.pdf.

Codina, S. (2015). Estudio de estabilidad de taludes en las comunidades de Ayagualo, Sacazil, Granadillas y El Limón municipio de Santa Tecla (zona sur de la Cordillera del Bálsamo). [Archivo PDF]. Organización Geólogo del mundo. <http://www.xeologosdelmundo.org/wp-content/uploads/2015/03/Santa-Tecla-El-Salvador.pdf>.

Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitolakis, K., Winter, M. G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J., y Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 209–263. doi: 10.1007/s10064-013-0538-8.

Cruden, D. M., y Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. *Special Report - National Research Council, Transportation Research Board*, 247, 36–75.

Djerbal, L., y Bahar, R. (2016). Numerical modeling of the effect of rainfall on Azazga landslide, Algeria. *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*, 2, 837–841. doi: 10.1201/b21520-98.

Duncan, C. W. (1999). *Foundation on rock* (2a ed.). Engineering Practice.

Duque, G. (2007). Cap 08: Intemperismo o meteorización. *Manual de Geología para Ingenieros*. 207-232. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Ehrlich, M., Pereira, D., y Cerqueira, R. (2018). Behavior of a colluvial slope located in Southeastern Brazil. *Landslides*, 15(8), 1595–1613. doi: 10.1007/s10346-018-0964-6.

Escobar, C., y Duque, G. (2016). Modelos de Análisis de Estabilidad. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. 117-150. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Estrada, B. &. (2010). El terremoto y posterior tsunami del 26 de diciembre de 2004 en Indonesia. [Archivo PDF]. Scientific Electronic Library Online. <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v72n145/a09v72n145.pdf>

Federal Highway Administration. (2006). *SOILS AND FOUNDATIONS: Vol. II*. Federal Highway Administration.

Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., y Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102(3–4), 85–98. doi: 0.1016/j.enggeo.2008.03.022.

Fernández, D. (2003). Procesos de remoción en masa y erosión fluvial en la quebrada del río Los Sosa, provincia de Tucumán. *Asociación Geológica Argentina*, 58(2), 255-266.

FHWA NHI. (2006). *SOILS AND FOUNDATIONS Vol. I*. Federal Highway Administration.

Ferreira, T., Mateos, R., y Roldán, F. (2015). Los deslizamientos de la cuenca baja del Río Darro (Granada, España). *Geogaceta*, 57, 103–106.

Gallardo Amaya, R. J., Guerrero Barbosa, T. E., y Macgregor Torrado, A. A. (2013). Investigación Geotécnica para la estabilización de las laderas del Barrio San Fermín, municipio de Ocaña, departamento de Norte de Santander (Colombia). *Inge Cuc*, 9(2), 66–74.

Galviz, F. (2016). Monitoreo superficial de movimientos en masa, empleando tecnología LiDAR, relacionando la geología, topografía e información geotécnica del sitio. [Archivo PDF]. Repositorio Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

<https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/466>.

Gao, W. (2018). Microtremor survey and stability analysis of a soil-rock mixture landslide: a case study in Baidian town, China. Springer-Verlag GmbH Germany, 1951-1961.

García, I. (2016). Factores geológicos-geotécnicos que controlan los deslizamientos inducidos por terremotos en zonas de alta y media actividad sísmica: caso de El Salvador. [Archivo PDF]. Repositorio Universidad Complutense de Madrid. <https://eprints.ucm.es/38243/>

García, M. (1998). Manual de estabilidad de taludes del INVIAS. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito".

García, M., López, G., Rivas, P., Galdeano, C., y Vera, J. (1980). Mesozoic palaeogeographic evolution of the external zones of the Betic Cordillera. *Geologie en Mijnbouw*, 59(2), 155-168.

Garrido, J., y Delgado, J. (2013). A recent, retrogressive, complex earthflow-earth slide at Cenes de la Vega, southern Spain. *Landslides*, 10(1), 83–89. doi: 10.1007/s10346-012-0358-0

Gil, E., y Dlugosz, M. (2006). Threshold values of rainfall triggering selected deep-seated landslides in the polish flysh carpathians. *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 40, 21-43.

González, L. (2002). Ingeniería Geológica. Madrid: PEARSON.

GSI. (1993). GEOLOGY OF MEGACRYST MARKER M3 HORIZON FROM AHMEDNAGAR PUNE, THANE, AND RAIGAD DISTRICTS, MAHARASHTRA STATE. India: Geological Survey of India.

Guadagno, M. C. (1999). The Debris Flow of 5-6 May 1998 in Campania, Southern Italy. *Landslide News*, 12, 5-7.

Gupta, S. K., Shukla, D. P., y Thakur, M. (2018). Selection of weightages for causative factors used in preparation of landslide susceptibility zonation (LSZ). *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9(1), 471–487. doi: 10.1080/19475705.2018.1447027.

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., y Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 13(6), 181–216. doi:10.1016/S0169-555X(99)00078-1.

Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., y Ardizzone, F. (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72(1–4), 272–299. doi 10.1016/j.geomorph.2005.06.002.

Hashemi, M. (2009). Investigation on causes of the Siruyeh Landslide, West Semirom (Iran). Springer-Verlag, 101-109.

Hidalgo, C. (2014). Estimación de la amenaza por deslizamientos detonados por sismos y lluvia. *REVISTA EIA*, 11(22), 103-117.

Highland, L. B. (2008). Manual de derrumbes: Una guía para entender todo sobre los derrumbes. [Archivo PDF]. Servicio Geológico de los EE.UU. <http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc2665/doc2665-contenido.pdf>

Ho, K. K., Chao, P. A., Lau, T. M., y Silva, S. D. (2012). Investigation of the 20 August 2005 fatal landslide at Fu Yung Shan Tsuen, Hong Kong. Springer-Verlag, 285-297.

Hobot, E., Janus, A., Zydrón, T., Gryboś, M., y Kubiś, M. (2015). WŁAŚCIWOŚCI GEOTECHNICZNE ŁUPKÓW PSTRYCH Z OKOLIC SZYMBARKU KOŁO GORLIC. *Acta Sci. Pol. Formatio Circumiectus*, 14(2) 231-241. doi:10.15576/ASP.FC/2015.14.2.231

Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslides types, an update. *Landslides*, 11, 343-354.

Hussain, G., Singh, Y., Bhat, G. M., Sharma, S., Sangra, R., y Singh, A. (2019). Geotechnical Characterisation and Finite Element Analysis of Two Landslides along the National Highway 1-A (Ladakh Region, Jammu and Kashmir). *Journal of the Geological Society of India*, 94(1), 93–99. doi:10.1007/s12594-019-1272-z

Ingenieros Betancourt. (2009). Estudio informativo de la ronda este metropolitana de Gestión de Infraestructuras de Andalucía S.A. Consejería de Obras Públicas y Transportes, Junta de Andalucía, Granada.

Instituto Mexicano del Transporte. (1998). Distribución, propiedades, clasificación y manejo de suelos residuales y transportados con aplicaciones a la ingeniería civil. México: Instituto Mexicano del Transporte

James, V. (2001). Discussion on "Bedding parallel shear zones as landslides mechanisms in horizontal sedimentary rocks". *Environmental and Engineering Geoscience*, 7(2): 217–219. doi: 10.2113/gseegeosci.7.2.217

Jennings, C. S. (1977). *Geologic Map of California: California Division of Mines and Geology, Geologic Data Map 2*, scale 1:750,000.

Jones, L. (2004). *Landslide Risk Assessment*. ICE Virtual Library. doi:10.1680/lra.31715.

Kanungo, D. P., Pain, A., y Sharma, S. (2013). Finite element modeling approach to assess the stability of debris and rock slopes: A case study from the Indian Himalayas. *Natural Hazards*, 69(1), 1–24. doi:10.1007/s11069-013-0680-4.

Kaya, A., Alemdağ, S., Dağ, S., y Gürocak, Z. (2016). Stability assessment of high-steep cut slope debris on a landslide (Gumushane, NE Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(1), 89–99. doi:10.1007/s10064-015-0753-6.

Kijowska-Strugala, M. (2015). *Transport zawiesiny w warunkach zmieniającej się antropopresji w zlewni Bystrzanki*. Polonia: Instytut geografii i przestrzennego zagospodarowania.

Krivoguz, D., y Bepalova, L. (2020). Landslide susceptibility analysis for the Kerch Peninsula using weights of evidence approach and GIS. *Russian Journal of Earth Sciences*, 20(1), 1–12. doi:10.2205/2019es000682

Lacerda. (2004). The behavior of colluvial slopes in a tropical environment, keynote lecture, landslides—advances in evaluation and stabilization. *Proceedings of the 9th International Symposium on Landslides*, 1315-1342.

Lagorreta, G., Bursik, M., Solene, P., Lugo, J. Paredes, L. y Aceves F. (2014). Inventario multitemporal, análisis de susceptibilidad y estimación de volumen de deslizamientos en el flanco SW del volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2), 343-354. doi: 10.18268/BSGM2014v66n2a9

Leng, Y., Peng, J., Wang, Q., Meng, Z., y Huang, W. (2018). A fluidized landslide occurred in the Loess Plateau: A study on loess landslide in South Jingyang tableland. *Engineering Geology*, 236, 129-136. doi: 10.1016/j.enggeo.2017.05.006

Mao YP, W. (2004). Seismic-geological ambient analyses of reservoir-induced. *J Seismol Res*, 27, 339-343.

Marulanda, A. (2017). LLUVIAS INTENSAS COMO DETONANTE DE DESLIZAMIENTOS Y AVENIDAS TORRENCIALES – CASOS DE ESTUDIO MANIZALES Y MOCOA, ABRIL DE 2017. [Archivo PDF]. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/319515742>

McLaughlin RJ, C. J. (2001). Geologic maps and structure sections of the southwestern Santa Clara Valley and southern Santa Cruz, mountains, California. U.S. Geological Survey. doi: 10.3133/mf2373

Melelli, L., Faralli, L., Gasparri, N., y Piccioni, R. (2017). Geotechnical Zoning for Urban Planning in Developing Countries (Duhok Governorate, Iraq). 4th World Landslide Forum, 809-817. doi: 10.1007/978-3-319-53498-5_93

Moayed, H., Huat, B. B. K., Mohammad Ali, T. A., Asadi, A., Moayed, F., y Mokhberi, M. (2011). Preventing landslides in times of rainfall: Case study and FEM analyses. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 20(2), 115–124. doi:10.1108/09653561111126067

Mojica, J., Colmenares, F., Villarroel, C., Macia, C. y Moreno, M. (1985). Características del flujo de lodo ocurrido el 13 de Noviembre de 1985 en el valle de Armero (Tolima, Colombia): Historia y comentarios de los flujos de 1595 y 1845. *Geología Colombiana*, 14(1), 107-140.

Montero, J. (2003). Notas de Geología para Ingenieros Civiles y Ambientales. [Archivo PDF]. Universidad Nacional. <http://www.docentes.unal.edu.co/jmmonteroo/docs/12%20METSUELOS.pdf>

Moya, M., Dilon, G., Revelo, B. y Ulpiano, V. (2008). Modelo para la estabilización de taludes en las carreteras del subtrópico del nor occidente del Ecuador a fin de evitar accidentes de tránsito y disminuir los costos de operación vehicular. [Archivo PDF]. Repositorio Universidad Técnica de Ambato. <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/2714>.

Nava, G. (2016). Análisis de riesgo por deslizamiento de ladera en el tramo Arroyo Guadalupe-El Mirador, de la autopista Tijuana-Ensenada, Baja California. [Archivo PDF]. Repositorio

Institucional del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/1309>

Negaresh, H. (1999). The geomorphology of Iran. Iran: University of Sistan and Baluchestan.

Nelson, J. L. (1992). Clay Mineralogy and Residual Shear Strength of the Santa Clara Formation Claystone, Saratoga Foothills, California. *Environmental & Engineering Geoscience*, 3, 299–310. doi:10.2113/gsegeosci.xxix.3.299

Nicholson, D. T., y Hencher, S. (1997). Assessing the potential for deterioration of engineered rock slopes. *Engineering Geology and the Environment. Proc. Symposium*, 1, 911–917.

Pappalardo, G. Mineo, S. y Calcaterra, D. (2017). Geomechanical Analysis Of Unstable Rock Wedges By Means Of Geostructural And Infrared Thermography Surveys. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 93-101. doi: 10.4408/IJEGE.2017-01.S-09

Pappalardo, G., Mineo, S., Angrisani, A. y Martire, D. (2018). Combining field data with infrared thermography and DInSAR surveys to evaluate the activity of landslides: the case study of Randazzo Landslide (NE Sicily). *Landslides*, 15(1), 2173-2193. doi: 10.1007/s10346-018-1026-9

Pardeshi, S., Autade, S. , y Pardeshi, S. (2013). Landslide hazard assessment: Recent trends and techniques. *SpringerPlus*, 2(1), 523. doi:10.1186/2193-1801-2-523

Rolandi G., Bartolini F., Cozzolino G., Esposito N. y Sannino D. (2000) - Sull'origine delle coltri piroclastiche presenti sul versante occidentale del Pizzo d'Alvano. *Quaderni di Geologia Applicata*, 7(1), 213-235.

Roldán, F., Rodríguez-Fernández, J., Villalobos, M., Lastra, J., Díaz-Pinto, G. y Pérez Rodríguez, A. (2012). Zonas: Subbético, Cuenca del Guadalquivir y Campo de Gibraltar. Editorial J. Navas.

Ruff, M., y Czurda, K. (2008). Landslide susceptibility analysis with a heuristic approach in the Eastern Alps (Vorarlberg, Austria). *Geomorphology*, 94(3–4), 314–324. doi:10.1016/j.geomorph.2006.10.032.

Ruíz, G., Rodríguez, E., Trejos, G., Medina, E., Ramírez, K., Sandoval, J. y Cepada, H. (2016). GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS

EN MASA ESCALA 1: 25.000. Colombia: Servicio Geológico Colombiano.

SAG. (2007). Guideline for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning. *Australian Geomechanics Journal*, 42, 13–36. doi: 10.1016/j.enggeo.2008.03.022

Sánchez, F. y Bocanegra, V. (2017). Evaluación del riesgo por deslizamientos, aplicando la guía del Servicio Geológico Colombiano, en un estudio de caso. [Archivo PDF]. Repositorio Pontificia Universidad Javeriana. file:///C:/Users/Usuari/Downloads/SanchezValbuenaFabianAndres2017.pdf

Sangseom, J., Yongmin, K. y Joon, K. (2015). The 27 July 2011 debris flows at Umyeonsan, Seoul, Korea. *Landslides*, 12, 799–813. doi: 10.1007/s10346-015-0595-0

Santacana, N. (2001). Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de sistemas de información geográfica. Aplicación a la cuenca alta del río Llobregat. [Archivo PDF]. Repositorio Universitat Politècnica de Catalunya. <http://hdl.handle.net/2117/93525>

Santo, A., Di Crescenzo, G., Forte, G., Papa, R., Pirone, M., y Urciuoli, G. (2018). Flow-type landslides in pyroclastic soils on flysch bedrock in southern Italy: the Bosco de' Preti case study. *Landslides*, 15(1), 63–82. doi:10.1007/s10346-017-0854-3

SGC. (2017). Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25000. Colombia: Servicio Geológico Colombiano. doi:10.1002/chem.201301917

Shah, C. R., Sathe, S. S., Bhagawati, P. B., y Mohite, S. S. (2019). A hill slope failure analysis: A case study of Malingoan village, Maharashtra, India. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 1–6. doi:10.1080/24749508.2019.1695714

Singh, T., Singh, R., Singh, B., Sharma, L., Singh, R., y Ansari, M. (2016). Investigations and stability analyses of Malin village landslide of Pune district, Maharashtra, India. *Natural Hazards*, 81(3), 2019–2030. doi:10.1007/s11069-016-2241-0

Soares, M., Vargas, E. do A., & Pereira, T. M. (2011). Back analysis of a landslide in a residual soil slope in Rio de Janeiro, Brazil. *Soils and Rocks*, 34(2), 139–149.

Song, H., y Cui, W. (2016). A large-scale colluvial landslide caused by multiple factors: mechanism

analysis and phased stabilization. *Landslides*, 13(2), 321–335. doi:10.1007/s10346-015-0560-y

Stark, T., Huvaj-Sarihan, N., y Li, G. (2008). Shear strength of municipal solid waste for stability analyses. *Environmental Geology*, 57(8), 1911–1923. doi:10.1007/s00254-008-1480-0

Suárez, J. (1998). *Deslizamiento y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Suárez, J. (2009). *Análisis Geotécnico Volumen I*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Sun, J. (1988). Environmental Geology in Loess Areas of China. *Environmental Geology and Water Sciences*, 12, 49–61. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02574827>

Tiwari, B., y Ajmera, B. (2017). *Landslides Triggered by Earthquakes from 1920 to 2015*. 4th World Landslide Forum.

Topuz, G., Altherr, R., Siebel, W., Schwarz, W., Zack, T., y Hasozbek, A. (2010). Carboniferous high-potassium I-type granitoid magmatism in the Eastern Pontides: the Gumushane pluton (NE Turkey). *Lithos* 116, 92-110. doi:10.1016/j.lithos.2010.01.003

Universidad de Texas. (2019). *Some Useful Numbers on the Engineering Properties of Materials*. Texas: Universidad de Texas.

USACE. (1990). *Engineering and Design - SETTLEMENT ANALYSIS*. U.S. Army Corps of Engineers

USACE. (1998). *Geotechnical Considerations*. U.S. Army Corps of Engineers

Van Westen, C., Castellanos, E., y Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3–4), 112–131. doi:10.1016/j.enggeo.2008.03.010

Varnes, D. (1984). Chapter 18: Landslide hazard zonation. *Rock Mass Classification*. 184–199. doi:10.1016/b978-008043013-3/50018-3

Xin, P., Liu, Z., Wu, S., Liang, C., y Lin, C. (2018). Rotational–translational landslides in the

neogene basins at the northeast margin of the Tibetan Plateau. *Engineering Geology*, 244, 107-115. doi: 10.1016/j.enggeo.2018.07.024

Yun Liao, S. (2015). A case history study on causation of the landslide in Santa Clara, California, USA. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(2), 185-192. doi: 10.1016/j.jrmge.2015.02.006

Zúñiga, M., Cuevas, A., Sánchez, M. y Barragán, T. (2015). Análisis de la amenaza de riesgo por deslizamiento de laderas en la ciudad de Chilpancingo, Gro. *Foro de Estudios sobre Guerrero*, 2(3), 224-243.

Zydroń, T., Gryboś, M., Kubiś, M., Hobot, E., y Janus, A. (2015). WŁAŚCIWOŚCI GEOTECHNICZNE ŁUPKÓW PSTRYCH Z OKOLIC SZYMBARKU KOŁO GORLIC. *Acta Sci. Pol. Formatio Circumiectus*, 14(2), 231–241. doi: 10.15576/ASP.FC/2015.14.2.231

Zydrón, T., & Prawica, E. (2015). Shear strength of clayey soils from the vicinity of Gorlice and Ciężkowice. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Land Reclamation*, 47(3), 225–236. doi:10.1515/sggw-2015-0027