

**ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN E INCIDENCIA DE LOS FACTORES
CONTRIBUYENTES EXTERNOS E INTERNOS, Y DETONANTES EN LA
ESTABILIDAD DEL TALUD DEL SALTO DEL CABRÓN Y SU ÁREA DE
INFLUENCIA ENTRE LOS AÑOS 2004 Y 2017**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OBTENER EL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**MARLA ISABEL VÁSQUEZ CASTAÑEDA
ANGIE SKARLET ZAMBRANO LEONES
AUTORAS**

**GUILLIAM BARBOZA MIRANDA
INGENIERO CIVIL, MSc. GEOTECNIA
DIRECTOR DEL PROYECTO**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
CARTAGENA DE INDIAS DTYC**

JUNIO DE 2018



**Universidad
de Cartagena**
Fundada en 1827

**ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN E INCIDENCIA DE LOS FACTORES
CONTRIBUYENTES EXTERNOS E INTERNOS, Y DETONANTES EN LA
ESTABILIDAD DEL TALUD DEL SALTO DEL CABRÓN Y SU ÁREA DE
INFLUENCIA ENTRE LOS AÑOS 2004 Y 2017**

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OBTENER EL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN GEOTECNIA, MATERIALES, VÍAS,
TRANSITO Y TRANSPORTE (GEOMAVIT)
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS DE GEOAMENZAS EN CASCOS
URBANOS Y RURALES**

AUTORAS:

MARLA VÁSQUEZ CASTAÑEDA

ANGIE ZAMBRANO LEONES

**GUILLIAM BARBOZA MIRANDA
INGENIERO CIVIL, MSc. GEOTECNIA
DIRECTOR DEL PROYECTO**

**WILLIAM MÉNDEZ MEDINA
INGENIERO CIVIL
ASESOR DEL PROYECTO**

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
CARTAGENA DE INDIAS DTYC

JUNIO DE 2018



Análisis de la evolución e incidencia de los factores contribuyentes externos e internos, y detonantes en la estabilidad del talud del Salto del Cabrón y su área de influencia entre los años 2004 y 2017



NOTA DE ACEPTACION

Firma del director
GULLIAM BARBOZA MIRANDA

Firma del jurado
MODESTO BARRIOS FONTALVO

Firma del jurado
DALIA MORENO EGEL



DEDICATORIAS

Primero le doy gracias a Dios por permitirme llegar hasta donde estoy, por bendecirme e iluminarme en cada uno de mis días.

Dedico esta investigación a mi familia. A mis padres, Giovanni y Solmery, por ser mis apoyos y mis guías en todo momento, por todos sus consejos, sus valores, su ejemplo de constancia y perseverancia y su gran amor. A mis hermanos, Johnny y Moisés, por siempre estar conmigo y ser mi fuerza en los momentos difíciles. Gracias a ustedes pude cumplir este gran sueño.

Marla Vásquez Castañeda

Dedico esta investigación a mis padres, Carmen y Benjamín, por forjarme el carácter y darme las herramientas necesarias para seguir el camino que hoy me pone más cerca de mis metas. Sin ellos este sueño habría sido mucho más difícil de cumplir, son para mí la luz de mi mundo.

Angie Zambrano Leones



TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	12
INTRODUCCIÓN	14
1. MARCO REFERENCIAL.....	19
1.1 ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES	19
1.2 MARCO TEÓRICO	25
1.2.1 Definición y partes de un talud	25
1.2.2 Procesos de degradación en un talud	26
1.2.3 Movimientos en masa	27
1.2.4 Definición del factor de seguridad.....	27
1.2.5 Modelos de análisis de estabilidad.....	29
1.2.6 Factores que afectan la estabilidad	34
1.2.7 La permeabilidad de los suelos y rocas.....	36
1.2.8 La infiltración.....	37
1.2.9 Ecuaciones hidrodinámicas que rigen el flujo de agua a través de los suelos	39
1.2.10 Flujo en suelos parcialmente saturados.....	42
2. OBJETIVOS	45
2.1 OBJETIVO GENERAL	45
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	45
3. ALCANCE.....	46
4.1 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN SECUNDARIA RELACIONADA CON LAS CARACTERÍSTICAS INTRÍNSECAS DEL TALUD DEL SALTO DEL CABRÓN	50
4.2 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN SECUNDARIA RELACIONADA CON LOS FACTORES CONTRIBUYENTES Y DETONANTES EN EL SALTO DEL CABRÓN.....	51
4.3 MODELACIÓN DE LA ESTABILIDAD E INFILTRACIÓN EN EL TALUD	51
4.3.1 Combinación de escenarios de estabilidad.....	52
4.3.2 Obtención de la geometría y parámetros de entrada requeridos por el software Slide V.6.0	53



4.3.3 Modelación de los perfiles típicos del Salto del Cabrón en Slide V.6.0.....	57
4.3 MODELACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA SUPERFICIE DEL TALUD EN EL SOFTWARE ARCGIS V.10.1.....	63
5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	69
5.1 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN SECUNDARIA REFERENTE A FACTORES INTRÍNSECOS DEL SALTO DEL CABRÓN.....	69
5.1.1 Caracterización geológica, geotécnica, geomorfológica y topográfica del Salto del Cabrón	69
5.1.2 Comportamiento hidrogeológico del Salto del Cabrón	72
5.1.3 Cobertura vegetal del Salto del Cabrón	74
5.2 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN SECUNDARIA REFERENTE A ACTIVIDAD ANTRÓPICA EN EL SALTO DEL CABRÓN Y EVENTOS DE LLUVIA.	81
5.2.1 Evolución de la actividad antrópica en el Salto del Cabrón	81
5.2.2 La precipitación en Cartagena	84
5.3 MODELACIÓN DE LOS PERFILES TÍPICOS CON EL SOFTWARE SLIDE V.6.0	88
5.3.1 Parámetros de entrada.....	88
5.3.2 Resultado de la modelación en Slide V.6.0 (Factores de Seguridad).....	95
5.3.3 Resultado de la modelación del cambio de la superficie en ArcGIS V.10.1	112
5.3.4 Comparación con estudios previos y literatura existente.....	117
6. CONCLUSIONES	120
7. LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES.....	123
7.1 LIMITACIONES EN EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	123
7.2 RECOMENDACIONES EN CUANTO A LAS LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	124
7.3 RECOMENDACIONES CONCEPTUALES DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN	124
BIBLIOGRAFÍA	126
ANEXOS	129



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Nomenclatura de taludes y laderas.	26
Figura 2. Nomenclatura de un deslizamiento.....	27
Figura 3. Bloque en plano inclinado y diagrama de fuerzas	28
Figura 4. Variación de Ru según la saturación del suelo.	31
Figura 5. Ilustración de las ecuaciones de flujo en el suelo.....	39
Figura 6. Localización Salto del Cabrón Cartagena de Indias DTyC.....	46
Figura 7. Esquema de la metodología propuesta para el desarrollo del proyecto.....	50
Figura 8. Localización de los perfiles de diseños en la topografía general.	53
Figura 9. Perfil de diseño número 1.....	54
Figura 10. Perfil de diseño número 2.....	54
Figura 11. Perfil de diseño número 3.....	54
Figura 12. Ensayo de permeabilidad in situ en la zona de recarga potencial.	56
Figura 13. Importación de bordes, de AutoCAD al programa Slide V.6.0.....	57
Figura 14. Configuración general del proyecto en Slide V.6.0.	58
Figura 15. Selección del método de equilibrio límite en Slide V.6.0.	58
Figura 16. Selección del método de análisis de agua subterránea en Slide V.6.0.	59
Figura 17. Etapas de análisis de infiltración en Slide V.6.0.	59
Figura 18. Definición de los parámetros geotécnicos de entrada en Slide V.6.0.....	60
Figura 19. Incorporación de cargas distribuidas en Slide V.6.0.	60
Figura 20. Incorporación de carga sísmica en Slide V.6.0.	61
Figura 21. Configuración de la malla de elementos finitos en Slide V.6.0.	61
Figura 22. Definición de las propiedades hidráulicas en Slide V.6.0.	62
Figura 23. Condición inicial de flujo en Slide V.6.0.	62
Figura 24. Definición del flujo transitorio en Slide V.6.0.	63
Figura 25. Creación de nuevo proyecto en ArcGIS V.10.1.	64
Figura 26. Conectar la carpeta del proyecto al programa ArcGIS V.10.1.....	64
Figura 27. Topografía importada en ArcGIS V.10.1.....	65
Figura 28. Creación de carpeta de datos de salida.	65
Figura 29. Creación de la superficie TIN.....	66
Figura 30. Convertir superficie TIN a datos Raster.....	67
Figura 31. Convertir superficie TIN a datos Raster.....	67
Figura 32. Resta de raster en ArcGIS V.10.1.....	68
Figura 33. Unidades geomorfológicas del Salto del Cabrón. Fuente: autores.	71
Figura 34. Perfil geológico con esquema del flujo de agua subterránea a partir de la zona de recarga en la caliza superior definido por la Universidad de Cartagena (2017).	74
Figura 35. Vegetación en el área de la cárcava del Salto de Cabrón.	76



Figura 36. Vegetación del Salto del Cabrón en el año 2005.....	77
Figura 37. Vegetación del Salto del Cabrón en el año 2009.....	78
Figura 38. Vegetación del Salto del Cabrón en el año 2015.....	78
Figura 39. Vegetación del Salto del Cabrón en el año 2016.....	79
Figura 40. Vegetación del Salto del Cabrón en el año 2017.....	79
Figura 41. Vegetación del Salto del Cabrón en el año 2018.....	80
Figura 42. Áreas de pérdida de vegetación y cárcavas secundarias (paleoacantilados).	80
Figura 43. Viviendas hasta la cota 32 en el año 2005.....	82
Figura 44. Viviendas actuales en el área de influencia del Salto del Cabrón.	83
Figura 45. Viviendas 136 y 138, ubicadas en el sector La Flores del Barrio La Quinta (cota 37) y el sector Lomas del San Blas del barrio El Toril (cota 35), respectivamente.....	83
Figura 46. Modelo conceptual de diseño.	89
Figura 47. Pendientes (en grados) del Salto del Cabrón año 2004.	113
Figura 48. Pendientes (en grados) del Salto del Cabrón año 2009.	113
Figura 49. Pendientes (en grados) del Salto del Cabrón.....	114
Figura 50. Variación de las pendientes entre los años 2009 y 2017.	115
Figura 51. Zona donde se han presentado los mayores cambios de pendientes.	116



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Procesos de degradación en un talud.	26
Tabla 2. Valores típicos de parámetros de resistencia para rocas.	32
Tabla 3. Ángulos de fricción típicos de rocas.	33
Tabla 4. Competencia de la roca de acuerdo al ensayo de Compresión uniaxial.	33
Tabla 5. Factores de tipo natural que intervienen en la estabilidad del talud.	35
Tabla 6. Factores externos de tipo antrópico que afectan la estabilidad del talud	35
Tabla 7. Grado de permeabilidad del suelo.	36
Tabla 8. Permeabilidad de los suelos.	37
Tabla 9. Valores típicos de K_p y K_v para el modelo de Schosinsky	39
Tabla 10. Caracterización geológica, geotécnica, geomorfológica y topográfica del Salto del Cabrón.	70
Tabla 11. Convenciones utilizadas para definir los parámetros geotécnicos del talud	72
Tabla 12. Distribución de la cobertura vegetal en el Salto del Cabrón en 2009.	74
Tabla 13. Distribución de la cobertura vegetal en el Salto del Cabrón en 2017.	75
Tabla 14. Número de días lluvioso promedio al mes y distribución de la precipitación mensual en Cartagena entre 1941 y 2017.	85
Tabla 15. Parámetros geotécnicos de entrada para el software Slide V.6.0.	90
Tabla 16. Parámetros utilizados para calcular la infiltración mensual.	92
Tabla 17. Retención e infiltración por método de Schosinky.	92
Tabla 18. Parámetros para definir K_s en la zona de recarga.	95
Tabla 19. Clasificación de los factores de seguridad.	96
Tabla 20. Factores de seguridad para el perfil 1 sin incidencia de la infiltración.	96
Tabla 21. Factores de seguridad para el perfil 2 sin incidencia de la infiltración.	97
Tabla 22. Factores de seguridad del perfil 3.	97
Tabla 23. Factores de seguridad en las faldas del perfil.	99
Tabla 24. Factores de seguridad del perfil 1 con incidencia de la infiltración.	100
Tabla 25. Factores de seguridad del perfil 2 con incidencia de la infiltración.	104
Tabla 26. Clasificación de pendientes en la zona del Salto del Cabrón.	115



ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Evolución de la actividad antrópica (asentamientos) entre 1960 y 2017.....	84
Gráfica 2. <i>Distribución de la precipitación mensual en Cartagena de 1941 a 2017.....</i>	86
Gráfica 3. Precipitación anual desde 1941 hasta 2017 en mm.....	87
Gráfica 4. Precipitación anual desde 2004 hasta 2017 en mm.....	87
Gráfica 5. Variación del nivel freático según distintos valores de Ru en la zona de recarga.	89
Gráfica 6. Precipitación mensual en los años 2004, 2007, 2010 y 2017.	91
Gráfica 7. Precipitación e infiltración en el año 2004.....	93
Gráfica 8. Precipitación e infiltración en el año 2007.....	93
Gráfica 9. Precipitación e infiltración en el año 2010.....	94
Gráfica 10. Precipitación e infiltración en el año 2017.....	94
Gráfica 11. Factores de seguridad del perfil 1 sin incidencia de la infiltración.....	96
Gráfica 12. Factores de seguridad del perfil 2 sin incidencia de la infiltración.....	97
Gráfica 13. Factores de seguridad del perfil 3.	98
Gráfica 14. Factores de seguridad para el perfil 1 con infiltración del año 2004.	101
Gráfica 15. Factores de seguridad para el perfil 1 con infiltración del año 2007.	101
Gráfica 16. Factores de seguridad para el perfil 1 con infiltración del año 2010.	102
Gráfica 17. Factores de seguridad para el perfil 1 con infiltración del año 2017.	102
Gráfica 18. Factores de seguridad para el perfil 2 con infiltración (2004).	105
Gráfica 19. Factores de seguridad para el perfil 2 con infiltración (2007).	105
Gráfica 20. Factores de seguridad para el perfil 2 con infiltración (2010).	106
Gráfica 21. Factores de seguridad para el perfil 2 con infiltración (2017).	106
Gráfica 22. Infiltración VS. Factor de seguridad en el perfil 1 (año 2004).	108
Gráfica 23. Infiltración VS. Factor de seguridad en el perfil 1 (año 2007).	108
Gráfica 24. Infiltración VS. Factor de seguridad en el perfil 1 (año 2010).	109
Gráfica 25. Infiltración VS. Factor de seguridad en el perfil 1 (año 2010).	109
Gráfica 26. Infiltración VS. Factor de seguridad en el perfil 2 (año 2004).	110
Gráfica 27. Infiltración VS. Factor de seguridad en el perfil 2 (año 2007).	110
Gráfica 28. Infiltración VS. Factor de seguridad en el perfil 2 (año 2010).	111
Gráfica 29. Infiltración VS. Factor de seguridad en el perfil 2 (año 2017).	111
Gráfica 30. Precipitación mensual VS. Eventos de deslizamiento en el Cerro de La Popa (año 2010).	112



ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Eventos de deslizamiento en el Cerro de La Popa en el año 2010.....	129
Anexo 2. Plano de Cobertura vegetal del Salto del Cabrón. Fuente: (Universidad de Cartagena, 2009).	130
Anexo 3. Plano de Cobertura vegetal del Salto del Cabrón. Fuente: (Universidad de Cartagena, 2017).	131
Anexo 4. Plano de topografía general del Salto del Cabrón.....	131
Anexo 5. Plano de topografía general del Salto del Cabrón.....	132
Anexo 6. Plano de topografía general del Salto del Cabrón.....	133
Anexo 7. Localización de los perfiles de referencia en la topografía del año 2009.	134
Anexo 8. Factores de seguridad de los perfiles de referencia en la topografía del año 2009.	134
Anexo 9. Superficie de falla en la parte media del perfil 1.....	135
Anexo 10. Superficie de falla en la parte baja del perfil 1.....	135
Anexo 11. Superficie de falla en la parte media del perfil 2.....	135
Anexo 12. Superficie de falla en la parte baja del perfil 2.....	136
Anexo 13. Superficie de falla en la parte alta del perfil 3.	136
Anexo 14. Superficie de falla en la parte baja del perfil 3.....	136
Anexo 15. Tabla A.2.3-2, valor de Aa y de Av para las ciudades capitales de departamento. Fuente: NSR-10.....	137
Anexo 16. Resumen características geotécnicas del perfil 1.	138
Anexo 17. Continuación resumen características geotécnicas del perfil 1.	139
Anexo 18. Continuación resumen características geotécnicas del perfil 1.	140
Anexo 19. Resumen características geotécnicas del perfil 2.	141
Anexo 20. Continuación resumen características geotécnicas del perfil 2.	142
Anexo 21. Resumen características geotécnicas del perfil 3.	143
Anexo 22. Continuación resumen características geotécnicas del perfil 3.	144



RESUMEN

Para que se produzca la inestabilidad y puesta en movimiento de una masa de terreno deben intervenir y modificarse de forma conjunta varios factores que comprenden, entre otros, las características geológicas, geotécnicas, geomorfológicas, topográficas, hidrogeológicas y de cobertura vegetal de los taludes; además de la actividad antrópica, las condiciones climáticas y sísmicas. En ese sentido, en el presente estudio se analizó la evolución e incidencia de los factores anteriormente mencionados en la estabilidad del talud del Salto del Cabrón y área de influencia entre los años 2004 y 2017, mediante la obtención de factores de seguridad por medio del software Slide V.6.0 en el que se modelaron distintos escenarios que incluían la aplicación de infiltración, sobrecarga y sismo; además se calculó el cambio de la superficie del terreno por medio del software ArcGIS V.10.1

Para esto fue necesario la recopilación y análisis de información secundaria referente a las características intrínsecas del talud, el comportamiento antrópico de la zona y los eventos de lluvia en los años 2004, 2007, 2010 y 2017. Se creó un modelo conceptual, en el cual, el estrato superior se tomó como zona de recarga para modelar la estabilidad de 2 perfiles típicos; se midió la incidencia de los asentamientos por medio de aplicación de sobrecarga en las faldas y en la cima del talud en 3 perfiles y se calculó el cambio de la superficie del talud mediante la realización de mapas de variación de pendientes.

La lluvia y su consecuente infiltración fueron los factores que más impactaron en la estabilidad del talud, ya que se observó en el perfil más crítico una reducción del factor de seguridad del 30,9%; 39,48% y 51,8% para el mes de noviembre en los años 2004, 2007 y 2017 respectivamente, con unos valores de 1,12; 0,98 y 0,78; lo cual indica estados de falla incipientes e inminentes que posiblemente generaron deslizamientos. Por otra parte, los asentamientos humanos redujeron los factores de seguridad entre un 12 y 22%. En general no se presentaron cambios significativos de la superficie, excepto por los observados en el flanco derecho de la corona de deslizamiento que se ve expuesta a fenómenos de erosión.



ABSTRACT

In order for the instability and movement of a land mass to happen, several factors must be intervened and modified together, including, among others, the geological, geotechnical, geomorphological, topographic, hydrogeological and vegetative features of the slopes and besides the anthropic activity, the climatic and seismic conditions. In this sense, in the present investigation, the evolution and incidence of the aforementioned factors were analyzed in the stability of the Salto del Cabrón slope and area of influence between 2004 and 2017, through and obtaining safety factors through software Slide V.6.0 in which different scenarios were modeled, including the infiltration, overload and earthquake application; In addition, the change in the surface of the land was calculated by using ArcGIS software V.10.1

For this, it was necessary to collect and analyze secondary information pertinent to the intrinsic characteristics of slope, the anthropogenic behavior of the area and the rain events in 2004, 2007, 2010 and 2017. A conceptual model was created in which the upper stratum was taken as a recharge zone to model the stability of 2 typical profiles; the incidence of the settlements was measured by applying an overload on the skirts and top of the slope in 3 profiles and the change of the surface of slope was calculated by making slope variation maps.

The rain and its consequent infiltration were the factors that most impacted the stability of slope, since a reduction of 30.9% of the safety factor was observed in the most critical profile; 39.48% and 51.8% for the month of November in the years 2004, 2007 and 2017 respectively, with values of 1.12; 0.98 and 0.78, which indicates incipient and imminent failure states that possibly generated landslides. On the other hand, human settlements reduced the security factors between 12% and 22%. In general, there were no significant changes in the surface, except for those observed on the right flank of the slip crown that is exposed to erosion phenomena.



INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años, los procesos de remoción en masa en laderas y taludes han traído consigo numerosas pérdidas en el ámbito social y económico (Polanco, 2001), por lo que la evaluación de la susceptibilidad ante este fenómeno y la capacidad de predecirlo han sido temas de gran interés para la comunidad científica (Aristizabal, Martínez, & Vélez, 2010).

Entre las causas más comunes para que un proceso de remoción en masa se genere se encuentran: los procesos litológicos (materiales con baja cohesión o poco consolidados); características topográficas (pendientes pronunciadas), procesos climáticos (precipitaciones frecuentes o regímenes de lluvias elevados); el tectonismo y los procesos antrópicos (deforestación, incendios forestales, construcción de viviendas y actividades extractivas) (CEELAT, 2014).

En ese orden de ideas, los estudios de estabilidad de laderas adquieren suma importancia cuando se tiene escenarios que reúnen todos o casi todos los requisitos necesarios para que se presente un evento de movimiento en masa. Se sabe que las zonas montañosas tropicales son muy susceptibles a sufrir problemas de deslizamientos de tierra debido a que generalmente, se reúnen cuatro de los elementos más importantes para su ocurrencia tales como son la topografía, sismicidad, meteorización y lluvias intensas (Suárez Díaz J. , 1998).

En las últimas dos décadas los asentamientos en Colombia se han localizado en un alto porcentaje en zonas con características como las anteriormente señaladas, fenómeno producido entre otros factores, por el crecimiento poblacional, el desplazamiento forzado y la desigualdad socio económica (CEELAT, 2014). La ciudad de Cartagena no es ajena a la realidad que afronta el país, pues la escasez de suelos aptos para hacer sostenible la demanda generada por la creciente expansión urbana y la pobreza extrema, ha llevado a que miles de familias ocupen zonas de alto riesgo de inundación, deslizamientos y contaminación, y agraven la presión urbana sobre sistemas tan importantes como el Cerro de La Popa (GEU, 2010).



El Cerro de la Popa es una elevación natural de unos 155 metros de altura sobre el nivel del mar. En la parte superior se construyó en 1606 a la cabeza del padre Fray Alfonso García Paredes de la Cruz el convento, que inicialmente era de manera y actualmente es una edificación de cal y canto, con cubiertas labradas en cedro, constituida por un coro alto, claustro alto y bajo, una torre, una hospedería y aljibes en los patios. Este Convento administrado, por la orden de los Agustinos Recoletos, es un atractivo turístico que ocasionan afluencia no solo de turistas sino de otras personas que en algunas ocasiones suben por caminos empinados aumentando la erosión del Cerro (Covo Torres, 2005) y (Universidad de Cartagena, 2017).

Hacia el sur de este Cerro, se encuentra ubicado el Salto del Cabrón (latitud $10^{\circ}25'8.03''N$, longitud $75^{\circ}31'31.81''O$), que en conjunto con su área de influencia comprende un zona de aproximadamente 12,1 Ha (Universidad de Cartagena, 2009). Esta parte de La Popa se encuentra afectada por un sistema de fallas locales que disminuyen las propiedades mecánicas de las rocas y suelos que conforman el subsuelo y aumentan su permeabilidad. Por sus características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas es susceptible a fenómenos denudativos tipo erosión en surcos y cárcavas, así como a fenómenos de remoción en masa tipo caída de bloques, flujos de fragmentos (rocas y detritos) y deslizamientos (Universidad de Cartagena, 2009)

El Salto del Cabrón es quizás uno de los puntos más críticos en cuanto a estabilidad de laderas en el Cerro de La Popa; en el pasado, especialmente hacia las partes alta y media del talud, han ocurrido volcamientos y caídas de roca y en la parte baja se observan procesos de erosión. Estos fenómenos se han generado no sólo por la condiciones intrínsecas del talud, sino por el efecto climático y la intervención antrópica por colonización de las laderas o actividad extractiva inadecuada hacia la base del mismo, factores que generan serios problemas de inestabilidad, como los presentados en las laderas de la zona sur del Cerro de La Popa (incluyendo el Salto del Cabrón) en los años 1994, 2004 y 2007 (Murcia Cañón & Carvajal Perico, 2017).



Más recientemente, a comienzos de marzo de 2017, se encendieron nuevamente las alarmas porque la piedra caliza que soporta el Convento de Los Agustinos Recoletos en el Salto del Cabrón, presentaba una pronunciada grieta, de hecho un fragmento de tamaño considerable se desprendió de la parte alta hasta llegar a uno de los barrios aledaños, pero sin dejar víctimas. De acuerdo con Murcia Cañón & Carvajal Perico (2017), dicha grieta existe allí desde hace más de 10 años y actualmente se localiza entre 12 y 16 metros bajo la terraza sur del Convento; tiene un ancho máximo de 5 a 7 cm y una profundidad visible de 50 cm a 60 cm.

Como se ve, el problema de inestabilidad de taludes en el Salto del Cabrón y en general en el Cerro de La Popa es antiguo y persistente, por lo que se han llevado a cabo diversos estudios técnicos en la zona, algunos de ellos realizados por la Universidad de Cartagena en convenio con la alcaldía mayor de la ciudad, como son: la *“Evaluación geotécnica y diseños de obras de estabilización en tres sitios críticos del Cerro de la Popa , Lo Amador, Loma del Diamante y Salto del Cabrón”* (2009), y los *estudios de estabilidad de laderas y diseños de obras de mitigación para el sector del Salto del Cabrón del Cerro de La Popa* (2017), también se realizó por parte del GEUC (Grupo de estudios urbanos) y Corvivienda (estudios socioeconómicos) el *Macroproyecto urbano para la recuperación integral del Cerro de La Popa en la ciudad de Cartagena de Indias* en 2010.

En estos estudios se pretende un mejoramiento integral del Salto del Cabrón. La Universidad de Cartagena en 2009 propuso como obras de mitigación pantallas en concreto lanzado adyacentes a las ya existentes para proteger de la erosión a las calizas expuestas de la ladera; reconfiguración de las paredes de canales existentes utilizando filtro en gravas con geotextil; estabilización de taludes con biomanto; implementación de trinchos para recuperar las cárcavas existentes de los procesos de erosión; construcción de nuevos canales; pavimentación de vías y construcción de muros de contención al pie de la ladera en el sector suroriental del área de estudio.

Adicionalmente a lo que ya había planteado en 2009, la Universidad de Cartagena propuso soluciones integrales adicionales en 2017 como son: un sistema de pantallas con anclajes



activos para proteger los afloramientos rocosos en la caliza; un muro apoyado en pantallas de pilotes para la conformación de las terrazas con terreno compactado en la parte media del talud; implementación de gaviones en secciones específicas de los canales que descienden en la zona central de la Cárcava para evitar que continúe la erosión; sumideros de rejilla con desarenador y la pavimentación de la calle para controlar el flujo que sale a la calle y la instalación de tuberías de PVC que conduciría las aguas lluvias bordeando el Convento hacia el costado oriental.

Sin embargo, en comparación con la gran cantidad de estudios adelantados, son pocas las obras de mitigación y mejoramiento que se han implementado en el Salto del Cabrón; en el 2008 se realizó la última intervención, principalmente en el nivel superior de rocas calizas arrecifales, mediante un muro de contención, sellamiento de grietas en recubrimientos de concreto existentes, nuevos recubrimientos de concreto reforzado con malla, pernos de anclaje y en la parte baja, limpieza de obras de drenaje (Murcia Cañón & Carvajal Perico, 2017); lo que puede ser una de las causas de que hoy los procesos de inestabilidad de taludes en el Salto del Cabrón sigan vigentes.

En este contexto, y teniendo en cuenta que las causas típicas mencionadas anteriormente para que se genere un fenómeno de remoción en masa, en conjunto con el abandono estatal, generan condiciones propicias para que se presenten con más facilidad estos fenómenos; resulta necesario conocer el comportamiento e incidencia de los factores contribuyentes y detonantes en los procesos de inestabilidad del talud del Salto del Cabrón y su área de influencia a través del tiempo, a fin de determinar cuáles de estos resultan tener más impacto en el deterioro de su estabilidad y poder así generar conclusiones y recomendaciones de manera conceptual que puedan ser útiles en la solución del problema.

Para cumplir con el objetivo principal de este trabajo de grado, se dio solución a la pregunta de investigación <<¿Cómo ha sido el comportamiento de los factores contribuyentes externos e internos, y detonantes que han incidido en los procesos de inestabilidad de laderas en del Salto del Cabrón y su área de influencia entre los años 2004 y 2017 con base en la evolución del Factor de Seguridad y el cambio de la superficie del talud?>>. El estudio se



realizó en el periodo de tiempo comprendido entre los años 2004 y 2017, ya que en ese lapso ocurrieron oleadas invernales importantes en el país, desatadas por el fenómeno de La Niña (2004, 2007 y 2010) y eventos de deslizamientos considerables en las laderas sur del Cerro de La Popa (incluyendo el Salto del Cabrón). Junto con la recopilación y análisis de la información secundaria pertinente fue posible realizar comparaciones cualitativas y cuantitativas a través de modelaciones computacionales en las que se tuvo en cuenta los factores contribuyentes y detonantes que intervienen en la estabilidad del talud.

Esta investigación se caracteriza por ampliar la literatura de referencia, especialmente los estudios desarrollados por la Universidad de Cartagena en el Salto del Cabrón (2009 y 2017), puesto que con esta se estaría complementando el análisis de estabilidad de laderas en la zona al incluir la infiltración producida por lluvias como un parámetro de estudio. Los resultados de factores de seguridad (sin incidencia de la infiltración) y del cambio de superficie fueron comparados con estudios de referencia realizados en el Salto del Cabrón entre 2005 y 2017, además se tuvo en cuenta investigaciones en las que se realizaron análisis cualitativos de estabilidad de taludes con influencia de olas invernales generadas por el fenómeno de La Niña en Colombia, para tener una visión general de la relación de la lluvia y los deslizamientos en el país.

Por último, este trabajo de grado cobra importancia en el campo profesional, pues contempla la línea de investigación de análisis de geoamenazas en cascos urbanos y rurales e incentiva la investigación del riesgo en zonas con amenazas de movimientos en masa para la planeación del ordenamiento territorial, la prevención y el control de desastres naturales.



1. MARCO REFERENCIAL

En este capítulo se recopila la bibliografía y antecedentes considerados pertinentes para el estudio de estabilidad de taludes y procesos de movimientos en masa donde se tiene en cuenta la incidencia y la evolución de los factores contribuyentes y detonantes que influyen en dicha estabilidad. También se muestran los principios, postulados y supuestos teóricos pertinentes al tema de esta investigación con base en la literatura correspondiente. La descripción de este esquema se subdivide en tres partes, en primer lugar los antecedentes, y el estado del arte y por último el marco teórico.

1.1 ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES

Con el fin de hallar las posibles metodologías y bases bibliográficas que den solución al problema, se recopila una serie de documentos académicos e investigaciones desarrolladas bajo la misma línea de estudio de estabilidad de taludes, caracterizados de acuerdo al grado de relevancia, similitud y complemento con el proyecto de investigación, en los cuales se maneja un enfoque internacional y nacional de la problemática que se aborda en esta investigación.

En un ámbito internacional se destaca el estudio realizado por Valverde (2010) en la ciudad de San José, Puerto Rico; quien realizó un análisis de estabilidad de laderas mediante el método de Fellenius y de Bishop sometiendo el talud a una sobrecarga, además, determinó la afectación de la lluvia sobre los parámetros de resistencia y obtuvo una probabilidad de falla haciendo uso del método probabilístico de Rosenblueth. La metodología implementada por el autor comprende ensayos de exploración, clasificación y resistencia del suelo; modelos de pronóstico de lluvia y transformación de la misma en humedad en el suelo por medio de un modelo realizado por Schosinsky (2007).

Valverde ratificó que el factor de seguridad efectivamente disminuye con el aumento de la precipitación, también determinó que el análisis probabilístico, que incluye la succión, logra disminuir la incertidumbre de los parámetros empleados y por consiguiente diseños más certeros y apegados a la realidad, ya que la succión genera un aumento en el factor de seguridad de aproximadamente 8%.



La anterior investigación propone una metodología bastante parecida a la realizada a la del presente proyecto en cuanto al tratamiento que se le da a la lluvia como factor detonante en los deslizamientos, puesto que en ambos se determina la infiltración por medio del modelo propuesto por Schozinsky en 2007, también se observa en ambos casos el uso de empleos de métodos de equilibrio limite y aplicación de sobrecargas para observar la estabilidad del talud.

Por otra parte Šilhán et al (2014) realizaron una investigación en Los Cárpatos (República Checa), en la cual obtuvieron resultados a partir de un método llamado *anillos de árboles de hoja ancha de gran número*, con el cual los autores reconstruyeron los patrones espaciales temporales de la reactivación de deslizamientos durante un período que abarca más de cien años (1884-2011). En la investigación se determinó que la mayoría de los eventos de deslizamiento reconstruidos de la serie de los anillos coinciden con datos hidrometeorológicos, lo que revela una correlación con fuertes lluvias de verano que duran de dos a diez días, además, los investigadores reconocen un estrecho vínculo entre la concentración de la actividad de deslizamiento y la presencia de roca madre flysch defectuosa o fracturada.

En el anterior estudio se destaca la incidencia de la precipitación y un suelo rocoso fracturado en la estabilidad del talud, lo que resulta en una zona con condiciones geomorfológicas y climáticas relativamente similares a las que se tienen en el estudio del Salto del Cabrón, puesto que ambos se sugiere periodos de fuertes lluvias de verano y posible actividad de movimiento en masa generada por presencia de roca fracturada. Sin embargo la obtención de los resultados se da en ambas investigaciones por modelos computacionales totalmente distintos.

Por último, Texeira, Fullen, Oliveira, Rodrigues y Shokr (2017) realizaron una revisión sobre los procesos de pendiente asociados con el movimiento de masas y la erosión del suelo y factores contribuyentes (incluyendo agentes físicos y humanos) en casos registrados en Brasil y Reino Unido. Los autores analizaron los efectos de la erosión, junto con los métodos correctivos apropiados de bioingeniería y el potencial de las medidas para prevenir este tipo



de degradación ambiental; concluyendo que, las tasas de erosión a menudo exceden con mucho los niveles tolerables y perjudican la capacidad de los sistemas de suelo para producir de manera sostenible los cultivos y que las construcciones inadecuadas pueden conducir a procesos geomorfológicos catastróficos, también sustentan que, la erosión del suelo y los datos de movimientos de masas informan sobre la viabilidad de las prácticas de conservación del suelo y estabilización de pendientes.

El anterior artículo se relaciona con la presente investigación, ya que se realiza el análisis de estabilidad de pendientes por medio del estudio de factores contribuyentes internos como son las características intrínsecas del talud y factores contribuyentes externos como es la actividad antrópica, que al sumarse modifican o atenúan condiciones geomorfológicas, sin embargo, en esta última se suma a esto el factor detonante que por excelencia es la lluvia y se hace un análisis evolutivo de los tres factores juntos.

En cuanto al ámbito nacional se cuenta con el aporte bibliográfico de la investigación desarrollada por Giraldo y Tejedas (2016) en Cali, Colombia. En ésta, los autores realizaron el análisis de estabilidad de taludes para el deslizamiento presentado en el barrio Brisas de Mayo de Santiago de Cali en noviembre de 1987 y estudiaron la relación lluvia-infiltración de forma desacoplada usando la función de permeabilidad no saturada, obtenida a partir del modelo de Van Genutchen (1980), la cual implementaron para la modelación. Los investigadores utilizaron los métodos de equilibrio límite (LEM) y reducción de resistencia (SRF) con condiciones de flujo transiente y estacionario respectivamente, para realizar la modelación a través de herramientas computacionales empleando el software Slide V.6.0. En este estudio se concluyó que el movimiento sí fue ocasionado por dicha lluvia dado el factor de seguridad de 0,99, por tanto los autores estiman que se puede considerar la precipitación empleada como una lluvia de diseño para el análisis de futuros taludes o de las laderas existentes.

La importancia del anterior estudio para la presente investigación radica en la gran similitud de las metodologías para estimar la incidencia de la precipitación en la estabilidad del talud, puesto que se emplea el modelo de análisis de propiedades hidráulicas por el modelo de Van



Genutchen y la herramienta computacional para el análisis de infiltración empleando el método de los elementos finitos es el software Slide V.6.0.

Otro aporte a nivel nacional corresponde a una investigación realizada por Camacho, Ramos, Escobar y Garzón (2017) en la Cordillera de los Andes en Colombia. En este trabajo, los autores cuantificaron la influencia de la geomorfología en la estabilidad de taludes como factor contribuyente interno por medio de un análisis basado en el método de elementos finitos con un modelo constitutivo elastoplástico, así como el régimen de flujo que afecta al factor de seguridad y determinaron las zonas de mayor susceptibilidad a la falla. El estudio concluye que las geoformas convexas presentan una mayor susceptibilidad a la falla, y el mecanismo que se espera cuando esta se presenta es del tipo progresivo; las geoformas cóncavas y rectas evidencian valores muy bajos de esfuerzos efectivos debido a la concentración del flujo en las zonas saturadas.

El anterior trabajo se asemeja al desarrollado en esta investigación, en el hecho de que para analizar la naturaleza y el comportamiento de un fenómeno de movimiento en masa se debe estudiar entre otros factores, aquellos denominados detonantes y contribuyentes internos, sin embargo la investigación en mención se estudia a fondo un factor contribuyente interno: la geomorfología del talud, el factor contribuyente externo que se refieren específicamente a la actividad antrópica de la zona de estudio. Por otra parte, para analizar el comportamiento de la lluvia en ambos casos se aplica el modelo de suelos no saturados propuesto por Van Genutchen.

Continuando con el ámbito nacional, Ramos, Trujillo-Vela y Prada (2015) desarrollaron una investigación en la que se entregó como producto final una base de datos de procesos de remoción en masa en Bogotá, incluyendo 2208 eventos de movimientos en masa ocurridos en el perímetro urbano de la ciudad entre 1996 y 2013. En ésta, se recopilaron de forma sistemática variables como tipo de suelo, tipo de movimiento, posible causa detonante del evento, cobertura del suelo y pendiente promedio del lugar de la inestabilidad, los investigadores además exploraron la relación entre el régimen de lluvias de Bogotá y la ocurrencia de movimientos en masa.



De esta manera, los autores concluyeron que las laderas cubiertas con árboles es donde menos se presentan deslizamientos, a diferencia de suelos cubiertos por arbustos y gramíneas. Encontraron también, que para Bogotá, la frecuencia de deslizamientos en función del ángulo de inclinación del talud indicó que la mayor cantidad de eventos se presentan en pendientes por encima de los 40°. Por otro lado, especificaron que el factor que puede tener mayor influencia en la generación de los procesos de remoción en masa para dicha ciudad es la lluvia acumulada, encontrándose de forma cualitativa, una relación entre los máximos registros de deslizamientos y las épocas de Niña (periodos de lluvia para Bogotá), tal como se registró en la última oleada invernal de 2010 y 2011 en la ciudad.

Por último, Moreno, Vélez, Montoya, y Rhenals (2006) estudiaron la relación entre la lluvia y los deslizamientos reportados en el departamento de Antioquia (Colombia) en el período comprendido entre 1929 y 1999. Realizaron la georreferenciación de 405 deslizamientos posiblemente producidos por lluvia en la región de estudio y efectuaron el análisis de la ocurrencia de los deslizamientos durante las fases cálida y fría del fenómeno ENSO (El Niño Southern Oscillation) y el ciclo intraanual de la precipitación en Colombia. Los autores destacan la relación entre un mayor número de deslizamientos por año en épocas de La Niña y una disminución de ellos en la fase de El Niño. El análisis mensual arrojó que febrero es el mes de menor número de deslizamientos (menos del 3% del total anual), siendo enero el mes más seco del año, favorece la condición de baja humedad antecedente para poca generación de deslizamientos y que el mes con más alta probabilidad de deslizamientos desencadenados por lluvia es octubre con una ocurrencia promedio del 18% de los que hay en el año. Por último, los autores determinaron, mediante análisis de la precipitación diaria acumulada, que las condiciones de lluvia más comunes para el desencadenamiento de un movimiento de suelo tienen que ver con altas cantidades de lluvia acumulada en el mediano plazo (15 días o más).

Ahora bien, teniendo un enfoque local, se presenta a continuación una serie de estudio desarrollados en Cartagena, en el Cerro de La Popa, debido a su gran importancia y relevancia, turística, ecológica, ambiental y social para la ciudad.



Covo (2005) desarrolló un informe técnico en la falda Sur del Cerro de la Popa luego de la ola invernal del año 2004 producida por el fenómeno de la Niña. En éste, el autor, que teniendo en cuenta las condiciones favorables para el sostenimiento de la flora que presenta el manto de limo arenoso existente en la falda sur del Cerro, recomendó protegerlo mediante la reforestación de las zonas que presentan deslizamientos. En cuanto al alto grado de erosión presente en el estrato limoso, Covo sugirió retener los sedimentos mediante la instalación de trincheras en madera, que resistan los esfuerzos a que estarán sometidas a la vez que revivan y continúen el proceso de crecimiento de vegetación. En este estudio también se determinó que hasta la fecha la falda sur del cerro de la Popa (Salto del Cabrón) presenta una estabilidad aceptable que es evidenciada por el relativo buen estado de las pendientes que lo constituyen. El ángulo de inclinación varía desde casi vertical en parte superior hasta unos 65 grados. El factor de seguridad calculado fue de 1.5, considerado por el investigador como satisfactorio.

Por otra parte, la Universidad de Cartagena y la Oficina de Planeación Distrital de Cartagena (2009) llevaron a cabo un estudio técnico como plan para la recuperación integral del Cerro de la Popa. El TOMO III de esta investigación comprende los estudios técnicos el Sector Salto del Cabrón y su área de influencia (12,1 Ha). La elaboración de este estudio requirió del conocimiento de las características geológicas, geomorfológicas, hidrológicas, geotécnicas, de cobertura y uso del suelo del terreno.

Los autores de este estudio concluyeron que el talud del Salto del Cabrón está en alto riesgo en un gran porcentaje y se muestra la incidencia de los factores litológicos, geomorfológicos, de cobertura vegetal, geotécnicos e hidrológicos, asociados al factor antrópico y la quema que influyen en dicha estabilidad. En ese sentido, se propusieron un Plan de Mejoramiento Integral que además de llevar un componente de recuperación vegetal, debía garantizar la estabilidad de las laderas con obras de mitigación permanentes y totales, entre las obras planteadas se tiene: una pantalla en concreto lanzado, reparación de canales existentes, nuevos canales y estructuras disipadoras, revegetalización de áreas desprovistas, recubrimiento de talud con biomanto, muros de contención, construcción de batea, trinchos, cuencos amortiguadores y pavimentación de vías.



Así mismo, el Grupo de Estudios Urbanos (GEU, 2010) realizó un estudio en el Cerro de la Popa, que tenía por objetivos la recuperación ecológica y paisajística del Cerro, sosteniendo su biodiversidad y valor paisajístico; la incorporación de zonas de riesgo al territorio de manera sostenible, reduciendo la vulnerabilidad de la población asentada dentro del Cerro; la formulación de proyectos de infraestructura dirigidos a la estabilización de terrenos para la mitigación de riesgos naturales y/o antrópicas y la reducción de la vulnerabilidad y el favorecimiento del desarrollo recreativo y turístico del Cerro de La Popa

Por último, la Universidad de Cartagena y la Oficina de Planeación Distrital de Cartagena (2017) nuevamente, desarrollaron una investigación que tenía por objetivos, entre otros, caracterizar y evaluar la geología, la geomorfología, la hidrogeología, la geotecnia, la cobertura vegetal, y el uso de suelo del área de estudio, evaluar geotécnicamente las geoamenazas del talud y diseñar las obras de mitigación necesarias para el área del sector del Salto del Cabrón en el Cerro de la Popa afectada por los fenómenos de remoción en masa, desde los puntos de vista, técnico, financiero y urbanístico.

1.2 MARCO TEÓRICO

1.2.1 Definición y partes de un talud

Se define como talud o ladera a una masa de tierra que posee una o varias pendientes, forma un ángulo con la horizontal y tiene cambios de altura significativa. La conformación del talud es de manera artificial y la de una ladera es por procesos naturales. Los taludes se pueden agrupar en tres categorías: los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención. (Suárez Díaz, 2009).

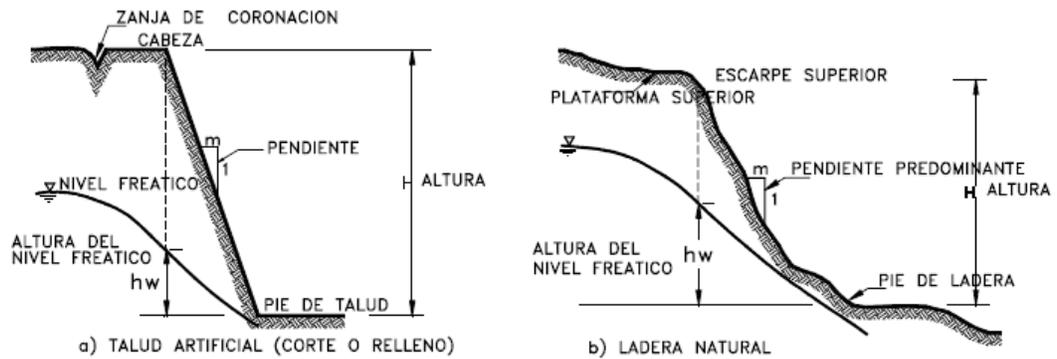


Figura 1. Nomenclatura de taludes y laderas.

Fuente: (Suárez Díaz J. , 1998).

1.2.2 Procesos de degradación en un talud

Suárez (1998) afirma que cuando un talud se modifica para la construcción de una obra de infraestructura, existe una relajación de los esfuerzos de confinamiento y una exposición al medio ambiente, cambiando la posición de equilibrio por un acelerado deterioro. Dicho deterioro abarca toda la alteración física y química de los materiales del talud y conlleva al desprendimiento o remoción de estos. En la Tabla 1 se presentan algunos de los procesos de degradación más comunes.

Tabla 1. Procesos de degradación en un talud.

PROCESO DE DEGRADACIÓN	DESCRIPCIÓN	CAUSAS	TIPOS
Caído de bloques	Caída ocasional de bloques individuales de roca de cualquier dimensión.	Debilitamiento de la masa de roca por fragmentación y ausencia de soporte lateral.	Pueden caer rodando o saltando.
Erosión	Desprendimiento, transporte y depositación de partículas o masas pequeñas de suelo o roca.	Fuerzas generadas por el movimiento del agua. Desprendimiento de granos por gotas de lluvia.	Erosión en surcos, el flujo superficial empieza a concentrarse sobre la superficie formando canales que se agudizan con el tiempo. Erosión en cárcava son canales de erosión con una sección superior a un pie, las tasas de flujo son mayores.

Fuente: modificado de (Suárez Díaz J. , 1998).



1.2.3 Movimientos en masa

Por movimientos en masa se entiende el desplazamiento del terreno que constituye una ladera o un talud, hacia el exterior del mismo y en sentido descendente. (Escobar Potes & Duque Escobar, 2016, pág. 56)

Los movimientos ocurren generalmente a lo largo de las superficies de falla, por caída libre, movimientos en masa, erosión o flujos. Algunos segmentos del talud o ladera, pueden moverse hacia abajo mientras otros se mueven hacia arriba. Los fenómenos de inestabilidad incluyen, generalmente, una combinación de procesos erosionales y denudacionales interrelacionados entre sí y a menudo mezclados. (Suárez Díaz, 2009, pág. 5)

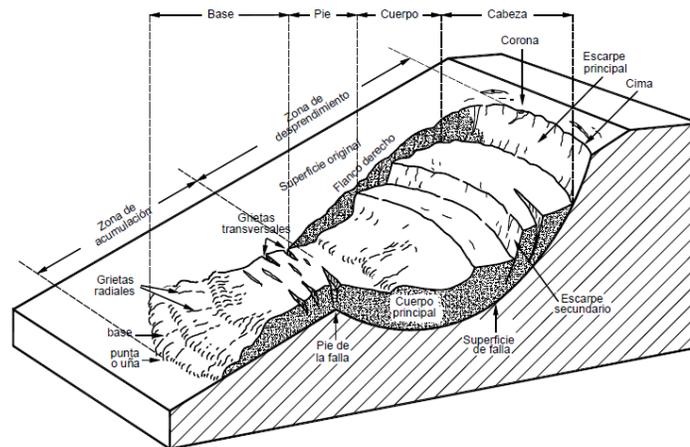


Figura 2. Nomenclatura de un deslizamiento
Fuente: (Suárez Díaz, 2009).

1.2.4 Definición del factor de seguridad

Según (OPS, 1997), la ilustración de concepto de factor de seguridad puede darse mediante la analogía de un bloque deslizante en un plano inclinado, tal como se muestra en la Figura 3, se tiene un plano inclinado que forma un ángulo β con la horizontal; sobre ese plano inclinado se encuentra un bloque rígido de masa M .

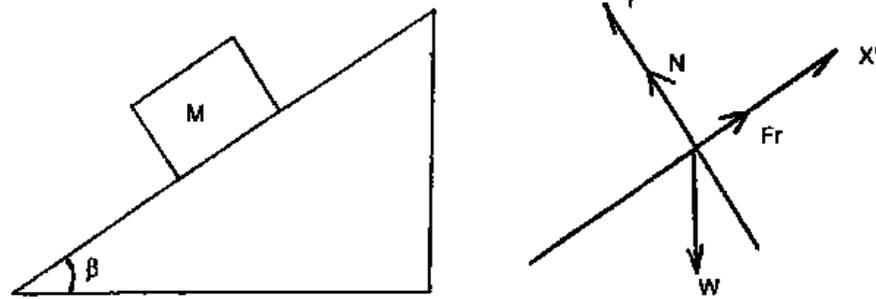


Figura 3. Bloque en plano inclinado y diagrama de fuerzas

Fuente: (OPS, 1997).

Las fuerzas que actúan sobre el bloque rígido, como se muestra en la figura 3.11, son: el peso del bloque (W), la normal (N) y la fuerza de roce (F_r) entre la base del bloque y el plano inclinado. Las fuerzas que actúan en la dirección del plano inclinado (X') son la fuerza de roce (F_r) y el componente del peso en esa dirección ($W \text{sen}\beta$). Las fuerzas que actúan en la dirección perpendicular al plano inclinado (Y') son el componente de peso en esa dirección ($W \text{cos}\beta$) y la normal (N).

No habrá deslizamiento del bloque a lo largo del plano inclinado mientras la fuerza de roce entre el bloque y el plano sea mayor o igual que la componente del peso en esa dirección.

El factor de seguridad (FS) contra el deslizamiento del bloque viene a ser el cociente entre la fuerza de roce (F_r) y la componente del peso en la dirección del plano inclinado o se puede calcular por la ecuación:

$$FS = \frac{F_f}{W \text{sen}\beta} \quad (1)$$

Craig (1986) define que la fuerza resistente viene a ser la resistencia al corte del suelo y las fuerzas desestabilizadoras vienen a ser las fuerzas gravitacionales o sísmicas. Por lo tanto, para un talud, el factor de seguridad se define como el cociente entre la resistencia al corte del suelo o roca a lo largo de una superficie de falla y los esfuerzos de corte que tienden a producir deslizamiento a lo largo de esa superficie de falla.



1.2.5 Modelos de análisis de estabilidad

Para la definición de la estabilidad de un talud se emplea en términos de un factor de seguridad (FS), que se obtiene a través de un análisis matemático de estabilidad. Todo el modelo debe abarcar la mayoría de los factores que afectan la estabilidad. (Suárez Díaz J. , 1998).

1.2.5.1 Condiciones drenadas y no drenadas

En un talud pueden ocurrir fallas en condiciones drenadas o no drenadas. Para el segundo caso, el suelo, que es de baja permeabilidad, no puede drenar durante el tiempo en que la inestabilidad es producto de la variación en la carga, como la remoción de materiales en la parte baja del talud o aumento de cargas. Generalmente, los suelos tienen permeabilidades suficientes para la disipación de las presiones de poro en exceso y tienen un comportamiento en condiciones drenadas. (Suárez Díaz J. , 1998, pág. 117).

1.2.5.2 Análisis con esfuerzos totales o efectivos

Siempre es posible analizar la estabilidad de un talud utilizando el método de presión efectiva, porque la resistencia del suelo es gobernada por las presiones efectivas tanto en la condición drenada, como en la condición no drenada. (Suárez Díaz J. , 1998, pág. 118)

El principio de tensiones efectivas, formulado por Karl Terzagui (1920), afirma que el comportamiento del suelo está gobernado por tensiones efectivas y no por totales. Es decir, cambios de tensiones totales no afectan el suelo, y por ende, la estabilidad de un talud. El agua ejerce presiones de poros sobre las partículas de suelo, lo cual disminuye la tensión efectiva y en consecuencia, la resistencia al corte del suelo.

Las tensiones verticales de un elemento de suelo, a una profundidad, se pueden determinar mediante la Ecuación 2. Se denomina tensión total vertical a la tensión debido al peso del material sobre el elemento de suelo.

$$\sigma_v = \gamma z \quad (2)$$



- σ : Tensión total vertical del suelo
- γ : peso unitario del suelo
- z : profundidad del elemento del suelo

La presencia del agua reduce el valor de la resistencia del suelo dependiendo de las presiones internas o de poros de acuerdo a la ecuación de Coulomb, en la cual La tensión vertical que actúa en el esqueleto del suelo (σ_v') corresponde a la diferencia entre la tensión total vertical (σ_v) y la presión de poros (u) (Suárez Díaz J. , 1998):

$$\sigma_v' = \sigma_v - u \quad (3)$$

Para un suelo 100% saturado, las presiones de poros, correspondientes a las presiones del agua en los espacios de vacíos del suelo, se determinan según la ecuación 4. Se supone que los poros están conectados entre ellos, por lo tanto la presión de poros se describe con una distribución hidrostática:

$$u = \gamma_w z_w \quad (4)$$

- u : presión de poros
- γ_w : peso unitario del agua
- H_w : profundidad vertical del punto por debajo del nivel de agua freática
- ***Relación de presión intersticial o de poros***

La presencia del agua en el interior del talud da lugar a la aparición de *presiones intersticiales* que pueden ser conocidas a partir de la red de flujo establecida. El terreno puede quedar dividido en dos zonas con presión intersticial negativa y positiva, siendo la línea de separación entre ambas el nivel freático en el que la presión del agua es igual a la atmosférica (EPTISA, 1987). Este es un método muy simple y popular para normalizar el valor de la presión de poros en un talud de acuerdo con la definición (Suárez Díaz, 2009):

$$Ru = \frac{u}{\sigma_v} \quad (5)$$



- u = Presión de poros
- σ_v = Esfuerzo total vertical del suelo a una profundidad z .

En ocasiones la presión del agua puede quedar caracterizada mediante el coeficiente de presión intersticial. Este coeficiente mide, en definitiva, la altura alcanzada por el agua en un talud, donde su valor máximo se obtiene para el caso del talud totalmente saturado. (EPTISA, 1987).

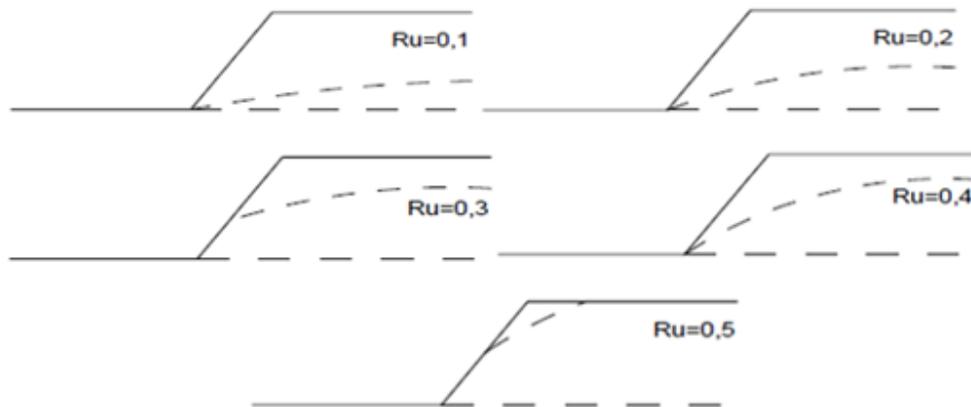


Figura 4. Variación de R_u según la saturación del suelo.

Fuente: (EPTISA, 1987) modificado por (Fonseca Pérez & Ruiz Arboleda, 2015).

1.2.5.3 Resistencia al cortante

La modelación o representación matemática del fenómeno de falla al cortante en un deslizamiento se realiza utilizando las teorías de la resistencia de materiales. Las rocas y los suelos al fallar al corte se comportan de acuerdo a las teorías tradicionales de fricción y cohesión, según la ecuación generalizada de Coulomb (Suárez Díaz J. , 1998):

$$\tau = c + (\sigma - \mu) \tan \phi \quad (6)$$

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan(\phi') + (\mu - \mu a) \tan(\phi') \quad (7)$$

El análisis de la ecuación de Coulomb requiere predefinir los parámetros, ángulo de fricción y cohesión, los cuales se consideran como propiedades intrínsecas del suelo. La ecuación (6) es aplicable a suelos saturados y la (7) a suelos no saturados.

Donde:



- τ = Esfuerzo de resistencia al corte
- c' = Cohesión o cementación efectiva
- σ = Esfuerzo normal total
- μ = Presión del agua intersticial o de poros
- μ_a = Presión del aire intersticial
- ϕ' = Angulo de fricción interna del material
- ϕ'' = Angulo de fricción del material no saturado

- **Resistencia al cortante en rocas**

Para determinar la resistencia al cortante en rocas intactas se utiliza comúnmente el ensayo de Compresión Simple o inconfiada, en el cual se obtiene un valor de la cohesión. Como la resistencia al cortante de la roca intacta no es lineal, las características de resistencia dependen del nivel de fuerza normal. La compresión uniaxial es quizás, el ensayo más apropiado para la caracterización de rocas ígneas intactas. Otro ensayo utilizado en algunos casos es el de Compresión Triaxial. Sin embargo, la estabilidad de los taludes en roca fracturada depende generalmente, de la resistencia a lo largo de las discontinuidades y por lo tanto se debe hacer esfuerzos por ensayar muestras a lo largo de las fracturas, juntas o planos de estratificación (Suárez Díaz J. , 1998).

En las siguientes tablas se presentan los parámetros de resistencia más comunes para diferentes tipos de roca:

Tabla 2. Valores típicos de parámetros de resistencia para rocas.

TIPO DE ROCA	PESO UNITARIO kN/m ³	COHESIÓN Mpa	ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)
Rocas ígneas duras	25 - 30	35 - 55	35 - 45
Rocas metamórficas	25 - 28	20 - 40	30 - 40
Rocas sedimentarias duras	23 - 28	10 - 30	35 - 45
Rocas sedimentarias blandas	17 - 23	1 - 20	25 - 35

Fuente: modificado por (Suárez Díaz J. , 1998) de (Hoek y Bray, 1981).



Tabla 3. *Ángulos de fricción típicos de rocas.*

FRICCIÓN	ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)	ROCA
Baja	20 a 27	Esquistos con alto contenido de mica y lutitas
Media	27 a 34	Areniscas, limolitas, neiss, pizarra
Alta	34 a 40	Basalto, granito, caliza, conglomerado

Fuente: modificado por (Suárez Díaz J. , 1998) de (Wyllie 1996).

Tabla 4. *Competencia de la roca de acuerdo al ensayo de Compresión uniaxial.*

COMPRESIÓN UNIAxIAL (Mpa)	COMPETENCIA DE LA ROCA
5 a 20	Muy débil
20 a 40	Débil
40 a 80	Resistencia media
80 a 160	Dura
160 a 320	Muy dura

Fuente: (Suárez Díaz J. , 1998).

1.2.5.4 Análisis de equilibrio límite

Este tipo de análisis requiere información sobre la resistencia del suelo. El sistema de equilibrio límite supone que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1.0. El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas (Suárez Díaz J. , 1998, pág. 121).

Entre los métodos de análisis por equilibrio límite se destacan los de Bishop simplificado (1955) en el que se suponen superficies de falla circulares y equilibrios de momentos, este autor asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. No se establecen condiciones de equilibrio para una dovela; el de Morgenstern y Price (1965), que se aplica a cualquier forma de superficie y falla y equilibrios de momentos y fuerzas, este modelo asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. La inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria y el Janbú (1968), el cual se aplica a cualquier forma de superficie de falla y equilibrios de fuerzas, en este se asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas., no



satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, se utiliza un factor de corrección F_0 . Los factores de seguridad son bajos (Suárez Díaz J. , 1998).

1.2.6 Factores que afectan la estabilidad

La estabilidad de taludes y laderas depende de variables topográficas, geológicas, ambientales y antrópicas que determinan la posibilidad de remoción de materiales. La mayoría del desarrollo de la inestabilidad se llega a presentar cuando las fuerzas desestabilizantes superan la resistencia de los materiales a desplazarse o ser arrastrados por corrientes. (Escobar Potes & Duque Escobar, 2016)

En los procesos de inestabilidad intervienen tres tipos de factores:

1.2.6.1 Factores de tipo natural

Entre los cuales sobresalen los relativos a los cambios en la condición de los materiales, la influencia directa o indirecta de la lluvia, la humedad del suelo, la actividad sísmica asociada al reactivamiento de fallas geológicas y la actividad de los volcanes. (Escobar Potes & Duque Escobar, 2016, pág. 61).



Tabla 5. Factores de tipo natural que intervienen en la estabilidad del talud.

FACTORES INHERENTES	Litología o formación geológica	Determinado patrón de comportamiento (permeabilidad, potencial de meteorización, erosividad, etc.)
	Estructura geológica	Superficies de debilidad, conformada por las discontinuidades, fracturas, planos de estratificación.
	Geomorfología	Formas de la superficie de la tierra, su origen, los procesos relacionados con su desarrollo y las propiedades de los materiales.
	Pendiente y relieve	Las altas pendientes producen la ocurrencia de inclinaciones, caídos y flujos de residuos.
	Hidrogeología	Se deben tener en cuenta las zonas de infiltración, la permeabilidad y la porosidad de los materiales del talud las fuentes, la localización y las características de los niveles freáticos, las corrientes subterráneas y sus fluctuaciones.
CLIMA	El comportamiento de la lluvia y la temperatura, definen las condiciones para los procesos de meteorización física y química	
ACTIVIDAD SÍSMICA	Un sismo puede producir aumento del esfuerzo cortante, disminución de la resistencia por aumento de la presión de poros y la deformación, asociados con la onda sísmica	

Fuente: Modificado de (Suárez Díaz, 1998).

1.2.6.2 Factores de tipo antrópico

Debido a la intervención del hombre por acciones tales como: la deforestación y el deficiente manejo del suelo, las sobrecargas, y el inadecuado manejo de las aguas en vertimientos y drenajes. (Escobar Potes & Duque Escobar, 2016, pág. 61).

Tabla 6. Factores externos de tipo antrópico que afectan la estabilidad del talud

PROCESOS DE URBANIZACIÓN	Existe una relación entre la ocurrencia de deslizamientos y la rapidez de los procesos de urbanización, en especial de los desarrollos desordenados.
MODIFICACIÓN DE LA TOPOGRAFÍA	La modificación de la topografía del terreno mediante cortes o rellenos puede producir la activación de un deslizamiento, Un corte en un talud produce varios cambios sustanciales en el estado de la formación residual.
DEFORESTACIÓN	La tala y quema indiscriminada de los bosques tropicales, especialmente cerca a los núcleos urbanos ha producido efectos catastróficos de erosión masiva y ocurrencia de deslizamientos.

Fuente: Modificado de (Suárez Díaz, 1998).



1.2.7 La permeabilidad de los suelos y rocas

La permeabilidad expresa la capacidad de un suelo o roca para permitir en su seno el paso del agua sin que dicho tránsito altere la estructura interna del cuerpo. Esta propiedad es muy importante dentro del análisis de estabilidad de laderas ya que de ella depende el comportamiento de la presión de poros en el suelo. En suelos con permeabilidad alta las presiones de poros pueden ascender en forma sustancial, durante una lluvia de gran intensidad. En los suelos con permeabilidad baja, los cambios son más lentos, aunque en ocasiones, las masas arcillosas pueden tener permeabilidad secundaria sorpresivamente alta, debido a la presencia de grietas, fisuras y lentes de materiales más permeables (Suárez Díaz, 2009).

La tasa de movimiento del agua a través del suelo es determinada en gran medida por el tamaño de los poros, los macroporos se encarga de una rápida percolación del agua y los microporos de retenerla (Donoso, 1992). En las rocas sedimentarias, la porosidad se divide en dos clases, porosidad primaria y porosidad secundaria. La porosidad primaria, es aquella comprendida por los espacios o vacíos existentes entre granos y la porosidad secundaria, es la compuesta por las fracturas y discontinuidades existentes en la roca. Lo que indica que rocas muy fracturadas pueden alcanzar permeabilidades relativamente altas y es posible encontrar agua subterránea tanto en los poros existentes entre los granos y en las discontinuidades o fracturas (Fetter, 2001).

En la Tabla 7 y la Tabla 8 se muestran algunos rangos de permeabilidad para suelos y rocas hallados en la literatura.

Tabla 7. Grado de permeabilidad del suelo.

DENOMINACIÓN	PERMEABILIDAD (cm/seg)
Muy alta	<10 ⁻²
Alta	10 ⁻² - 10 ⁻⁴
Moderada	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁵
Baja	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁷
Muy baja	10 ⁻⁷ - 10 ⁻⁹
Impermeable	>10 ⁻⁹

Fuente: (Martínez Vargas, 1990).



Tabla 8. Permeabilidad de los suelos.

K (cm/s)	10 ²	10 ¹	10 ⁰	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹
Drenaje	Muy bueno a bueno						Malo		Impermeable			
Capa sello	No apto						Poco apto		Apto			
Suelo	Grava y grava arenosa			Arena limosa			Limoso		Arcilloso			

Fuente: modificado por (Martínez Vargas, 1990) de (Márquez Cárdenas, 1987)

1.2.8 La infiltración

La infiltración se define como el movimiento del agua desde la superficie del terreno hacia el suelo o roca por los poros o intersticios y discontinuidades de la masa térrea. El porcentaje de infiltración corresponde a la proporción de lluvia que se infiltra. La lluvia sobre la superficie de la tierra puede conducir a dos condiciones diferentes de frontera (Suárez Díaz J. , 1998):

- Superficie del talud inundada. La intensidad de la lluvia en este caso es mayor que la cantidad de agua que puede infiltrarse dentro de la tierra.
- Infiltración controlada. La intensidad de la lluvia es menor que el flujo máximo de agua que se puede infiltrar en el talud.

La cantidad de agua que penetra o se infiltra en la tierra queda determinada por varios factores (Suárez Díaz J. , 1998):

- Cantidad, intensidad y tipo de precipitación.
- Ritmo de precipitación. Cuanto más rápidamente cae la lluvia, menos agua penetra, pues se satura la superficie del terreno y no permite la infiltración rápida.
- Pendiente superficial. La infiltración es mayor en terrenos más planos a los que corresponde velocidades de escurrimiento superficial menores.
- La permeabilidad de los suelos y las rocas.
- La estructura de suelos y rocas, especialmente en lo que se refiere a fracturación, estratigrafía y la secuencia de los estratos permeables y los impermeables.
- Cantidad y tipo de vegetación.



Schosinsky y Losilla (2000) propusieron una ecuación para calcular la de lluvia que penetra al suelo a partir teniendo en cuenta la precipitación mensual de la zona de estudio, los diferentes valores de infiltración básica de los suelos, la cobertura vegetal del suelo y su pendiente:

$$P_i = (C_i)(P - Ret) \quad (8)$$

Donde:

P_i = Precipitación que infiltra mensualmente

P = Precipitación mensual en [mm/mes] (dato meteorológico).

Ret = Retención de lluvia mensual por follaje en [mm/mes] al suelo en [mm/mes].

C_i = Coeficiente de infiltración [adimensional]

Los autores estiman que el coeficiente de precipitación depende de la pendiente del terreno, el tipo de cobertura vegetal, la permeabilidad y la textura del suelo:

$$C_i = K_p + K_v + K_{fc} \quad (9)$$

Donde:

C_i = Coeficiente de infiltración [adimensional].

K_p = Fracción que infiltra por efecto de pendiente [adimensional]

K_v = Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal [adimensional]

K_{fc} = Fracción que infiltra por textura del suelo [adimensional]

$$K_{fc} = 0,267 \ln(fc) - 0,000154fc - 0,723 \quad (10)$$

Para aplicar esta ecuación, el rango de fc ha de encontrarse entre 16 a 1568 mm/día. Para valores de fc menores a 16 mm/día, $K_{fc} = 0,0148fc/16$. Para valores de fc mayor a 1568 mm/día, $K_{fc} = 1$. El valor de fc corresponde a la permeabilidad del suelo saturado, en los primeros 30 centímetros de profundidad (permeabilidad).

Schosinsky y Losilla consideran que lluvias menores de 5 mm mensuales, no van a generar infiltración ya que se considera que en un mes con lluvia, al menos 5mm son retenidos por el follaje sin llegar al suelo Para calcular la retención de lluvia mensual interceptada por el follaje (Ret), se aplicará la siguiente ecuación:

$$Ret = (P)(C_{fo}) \quad (11)$$



Donde:

C_{fo} : Coeficiente de follaje

Tabla 9. Valores típicos de K_p y K_v para el modelo de Schosinsky

VALORES TÍPICOS DE K_p			VALORES TÍPICOS DE K_v	
Tipo de pendiente	Rango	K_p	Tipo de cobertura vegetal	K_v
Muy plana	0,02% - 0,06%	0,3	Cobertura con zacate menos del 50%	0,09
Plana	0,3% - 0,4%	0,2	Terrenos cultivados	0,1
Algo plana	1% - 2%	0,15	Cobertura con pastizal	0,18
Promedio	2% - 7%	0,1	Bosques	0,2
Fuerte	> 7%	0,06	Cobertura con zacate más del 75%	0,21

Fuente: (Schosinsky N., 2007).

1.2.9 Ecuaciones hidrodinámicas que rigen el flujo de agua a través de los suelos

A continuación se presentan las ecuaciones que describen el comportamiento del agua en los suelos recopiladas por Torres, Angelone, & Garibay (2010). Si se considera una región de flujo (un elemento de suelo a través del que fluye agua), de la que forma parte un elemento paralelepípedo de dimensiones diferenciales (dx , dy y dz), tal como se muestra en la siguiente figura:

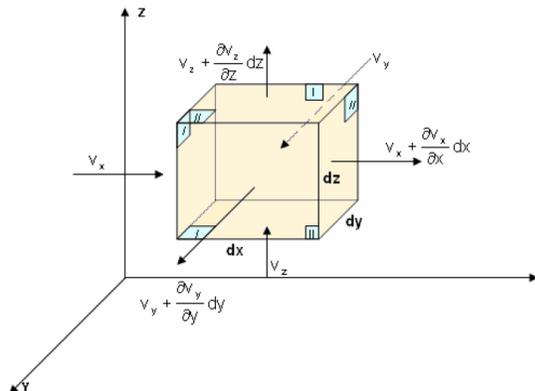


Figura 5. Ilustración de las ecuaciones de flujo en el suelo.

Fuente: (Torres, Angelone, & Garibay, 2010).



Se supone que la velocidad v con que el agua pasa por el elemento posee tres componentes v_x , v_y , v_z , y que éstas son sólo función de x , y , z , pero no del tiempo (puesto que por hipótesis se trata de un régimen estacionario) y dichas componentes son funciones continuas que admiten cualquier orden de derivación necesario al razonamiento expuesto. En estas condiciones, si en las caras I de la Figura 5, las componentes de velocidad del agua son v_x , v_y , v_z ; en las caras II estas mismas componentes son:

$$v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx \quad (12)$$

$$v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} dy \quad (13)$$

$$v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz \quad (14)$$

Durante el flujo, la cantidad de agua que entra al elemento, en un régimen establecido, tiene que ser igual a la que sale. Por lo tanto, teniendo en cuenta que el caudal que pasa por una sección puede expresarse como el producto del área de la sección por la velocidad del flujo puede escribirse:

$$\begin{aligned} &v_x dydz + v_y dx dz + v_z dx dy = \\ &= \left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx\right) dydz + \left(v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} dy\right) dz dx + \left(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz\right) dy dx \quad (15) \end{aligned}$$

En la expresión anterior, el primer miembro representa el caudal que entra al elemento y el segundo el que sale. Reduciendo términos semejantes y reordenando:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} dx dy dz + \frac{\partial v_y}{\partial y} dy dz dx + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz dy dx = 0 \quad (16)$$

De donde:

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



La ecuación anterior juega un papel importante en la teoría de flujo de agua y se conoce con el nombre de **Ecuación de continuidad**. Si también se supone válida la Ley de Darcy, la velocidad de descarga a través del elemento es:

$$v = kxi = -k \frac{\partial h}{\partial s} \quad (18)$$

Lo cual, expresando al gradiente hidráulico a través de sus tres componentes, da lugar a:

$$v_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad (19)$$

$$v_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad (20)$$

$$v_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (21)$$

En este caso, el suelo se considera anisótropo en lo referente a su permeabilidad, en las direcciones x , y , z . Introduciendo estas ecuaciones en la ecuación 18, se tiene:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (22)$$

Si además, la masa de suelo en estudio, a través de la cual filtra el agua, es isótropa en lo referente a permeabilidad, entonces:

$$x k = y k = z k = k \quad (23)$$

Considerando esas hipótesis, la ecuación 23 puede simplificarse, dando lugar a lo que se conoce como la ecuación de **Laplace**:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \nabla^2 h = 0 \quad (24)$$

En los problemas prácticos de la Mecánica de Suelos, es muy frecuente que el flujo en una sección de la región considerada, transversal a su eje longitudinal, sea idéntico al que se tiene



en cualquier otra sección. Así, los efectos en los bordes de la región de flujo pueden ignorarse y, de esa manera, el problema de flujo puede estudiarse bidimensionalmente como contenido todo él en el plano XY . En estas condiciones la ecuación 23 puede escribirse en forma más simplificada suponiendo un suelo isotrópico como:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \nabla^2 h = 0 \quad (25)$$

1.2.10 Flujo en suelos parcialmente saturados

Un suelo parcialmente saturado, es definido comúnmente como un medio que contiene tres fases: sólidos, agua y aire. Sin embargo, se ha propuesto la necesidad de tener en cuenta una cuarta fase, la cual hace referencia a la interfaz aire – agua. En un suelo, incluso la presencia de la cantidad más pequeña de aire, hace que dicho suelo sea parcialmente saturado (Fredlund, Morgenstern, & Widger, 1977).

La lluvia y otros tipos de precipitación proporcionan un flujo descendente que se incorpora en el terreno, condición que determina las características de presión en el agua existente en los poros del suelo. En estos casos, puede eventualmente, darse la saturación del suelo (Fredlund y Rahardjo, 1993).

Un suelo parcialmente saturado se encuentra sometida a una presión de aire u_a , la cual es mayor que la presión de agua (u_w); la diferencia de presión ($u_a - u_w$), se denomina succión matricial. La mayoría de problemas en ingeniería, en donde existen suelos parcialmente saturados, son, comúnmente, el resultado de cambios en el entorno. Un ejemplo de ello, ocurre cuando la estabilidad de una ladera se ve disminuida por una serie de eventos de lluvias fuertes, situación que reduce la succión en el suelo. Estos cambios en el entorno afectan principalmente al componente de la succión matricial (Marín Tamayo, 2013).



1.2.10.1 Relaciones entre comportamiento del suelo parcialmente saturado y su contenido de agua

El estudio de la zona no saturada es importante ya que ésta es el nexo entre el agua superficial y el agua subterránea, para entender el comportamiento del suelo en éstas zonas, es necesario que se definan las relaciones entre la humedad del suelo y la succión y la conductividad hidráulica no saturada y la succión, es decir las funciones hidráulicas del suelo y por lo tanto, las propiedades hidráulicas del mismo. Estas relaciones se encuentra identificadas en la literatura de distintas maneras, incluyendo función de retención de agua, curva de humedad característica, y curva presión capilar – saturación. Esta función relaciona un factor de capacidad, el contenido de agua (humedad), con un factor de intensidad, el estado de energía del suelo – agua (Barrera, Muñoz, Colmenares, & Donado, 2003).

El contenido de agua puede ser expresado de diferentes maneras, como el contenido de agua gravimétrico (ω), el contenido volumétrico de agua (θ), la saturación (S), la porosidad (n) y el contenido normalizado de agua (Θ). La relación entre estos parámetros puede verse a continuación:

$$\theta = \frac{\text{volumen de agua}}{\text{volumen total}} \quad (26)$$

$$\theta = nS \quad (27)$$

$$S = \frac{\omega * G_s}{e} \quad (28)$$

$$e = \frac{n}{1 - n} \quad (29)$$

$$\Theta = \frac{\theta_i - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (30)$$

Donde:

- e : relación de vacíos.



- G_s : gravedad específica de los sólidos
- θ_r : contenido volumétrico de agua que persiste en el suelo, posterior a haberse drenado completamente
- $\theta_s - \theta_r$: contenido volumétrico de agua máximo existente o porosidad efectiva,

Van Genuchten (1980), propone la siguiente expresión basada en el modelo de Mualem, para la determinación de la curva característica agua – suelo en un plano contenido volumétrico de agua – succión ($\theta - \psi$);

$$S = \Theta = \frac{\theta_i - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right)^m \quad (31)$$

- $m = 1 - \frac{1}{n}$: representa un parámetro del suelo función del contenido residual de agua
- α : es un parámetro de entrada de aire del suelo
- n : parámetro función de la tasa de extracción de agua, una vez el valor de entrada de aire se ha excedido

Cabe resaltar, que la metodología original de Mualem propone en vez de la succión, la cabeza de presión h :

$$S = \frac{1}{(1 + (\alpha h)^n)^m} \quad (32)$$

Finalmente Van Genuchten también desarrolló un modelo para el cálculo de conductividad hidráulica K_s utilizando el modelo de Mualem:

$$K = K_s \left(\sqrt{S} \left[1 - \left(1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \right) \quad (33)$$

Donde K es la permeabilidad intrínseca del suelo.



2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la evolución e incidencia de los factores contribuyentes (externos e internos) y detonantes en la estabilidad del Salto del Cabrón y área de influencia entre los años 2004 y 2017, mediante análisis de información secundaria y modelaciones computacionales que permitan comparar la variación de los factores de seguridad y la superficie del terreno, a fin de determinar cuáles de estos factores impactan más la estabilidad del talud de la zona de estudio y proponer recomendaciones conceptuales de mitigación y prevención.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir las condiciones intrínsecas y los factores contribuyentes internos del talud del Salto del Cabrón y su área de influencia entre los años 2004 a 2017, como son las características geológicas, geotécnicas, geomorfológicas, topográficas y de cobertura vegetal.
- Determinar los factores contribuyentes externos y detonantes presentados en el talud del Salto del Cabrón y su área de influencia entre los años 2004 y 2017, como son eventos de lluvia y procesos antrópicos (asentamientos), con base en bases de datos históricas acerca de en la zona de estudio.
- Modelar los escenarios de estabilidad del talud del Salto del Cabrón en el software Slide V.6.0®, teniendo en cuenta los factores contribuyentes y detonantes presentados en el talud entre los años 2004 y 2017.
- Describir el cambio de la superficie del talud mediante el uso del software ArcGIS V.10.1®.
- Identificar los factores que más han incidido en la estabilidad del talud del Salto del Cabrón y su área de influencia entre los años 2004 y 2017 y establecer de acuerdo a los resultados obtenidos conclusiones y recomendaciones de manera conceptual, acerca de su condición de estabilidad.



3. ALCANCE

Esta investigación se desarrolló en la ciudad de Cartagena de Indias DTyC. El área de estudio, correspondiente al Salto del Cabrón, se encuentra ubicado en el Cerro de La Popa en el extremo sur, posee una extensión aproximada de 12,1 Ha (Universidad de Cartagena, 2009) latitud $10^{\circ}25'8.03''N$, longitud $75^{\circ}31'31.81''O$.



Figura 6. Localización Salto del Cabrón Cartagena de Indias DTyC.
Fuente: tomado de Google Earth 2017 y modificado por los autores.

El trabajo de grado se realizó durante el primer semestre del año 2018, tiempo en el que se hizo una recopilación de información procedente principalmente de los estudios realizados por la Universidad de Cartagena en convenio con el Distrito de la ciudad en el Salto del Cabrón (2004, 2009 y 2017), además de informes, estudios, tesis de grado y documentos afines realizados en la zona de estudio y zonas con características similares en cuanto a suelo y clima. Se requirió también el uso de bases de datos históricas (IDEAM) e imágenes satelitales (Google Earth®) para obtener información sobre la precipitación en Cartagena y actividades de carácter antrópico que posiblemente han impactado la cobertura vegetal y la



estabilidad de taludes en el Salto del Carbón y su área de influencia entre los años 2004 y 2017.

Para cumplir con el objetivo de la investigación, se estudió el cambio en el tiempo de los factores contribuyentes externos e internos, y detonantes que inciden en dicha estabilidad de laderas del Salto del Cabrón. En cuanto a los factores contribuyentes internos se contó con las características geológicas, geomorfológicas, geotécnicas, topográficas hidrogeológicas y de cobertura vegetal de la zona de estudio. En cuanto a los factores contribuyentes externos se estudió la actividad antrópica en el talud y su área de influencia, haciendo énfasis en la invasión con viviendas y la deforestación. Como factores detonantes se presenta la variación a lo largo de los años de la precipitación y su incidencia en el factor de seguridad del talud.

Así mismo, para la obtención de estos factores de seguridad se utilizó el software Slide V.6.0®, en el cual se trabajó con tres secciones típicas del Salto del Cabrón y con datos de entrada básicos (parámetros mecánicos necesarios) como lo son el peso unitario seco (γ_d) y saturado del suelo (γ_{sat}); la cohesión (C) y el ángulo de fricción interna (ϕ). Estos datos fueron obtenidos de los estudios afines ya mencionados. Para el análisis se utilizaron los siguientes métodos de equilibrio límite: Bishop simplificado, Janbú y Morgenstern-Price.

Se determinaron factores adicionales necesarios para el modelo, como son los coeficientes horizontales y verticales de aceleración sísmica (A_a y A_v), el coeficiente para determinar la presión de agua (R_u), los valores de infiltración mensual promedio en el estrato de caliza, calculados a partir de modelo de Schosinsky y el parámetro de permeabilidad saturada del suelo K_s (Van Genuchten); Para definir este último factor, fue necesario realizar un ensayo de permeabilidad en campo en la parte alta del cerro al considerar el estrato de calizas como zona de recarga. La actividad invasiva y de urbanización fue modelada mediante la aplicación de sobrecargas que representan los asentamientos por viviendas en las faldas del talud y la presencia del convento de los Agustinos Recoletos en la cima del mismo.

De esta manera se garantizó que la modelación se acercara lo más posible a las condiciones reales del talud y que se consideraran los distintos factores contribuyentes externos y detonantes, a fin de evaluar su incidencia en el deterioro del Salto del Cabrón.



Por otra parte, para el modelado de la superficie del Salto del Cabrón, se empleó el software para el modelado del terreno y análisis de superficies ArcGIS V.10.1, en el que se requirió como parámetro de entrada las curvas de nivel de los levantamientos topográficos realizadas por la Universidad de Cartagena en 2009 y 2017 y se obtuvo como resultado un análisis de variación de pendientes; por consiguiente en este proyecto no se entregaron mapas y/o planos de curvas de nivel o afines.

Es necesario resaltar que no se tomaron en consideración todos los factores existentes de tipo contribuyente externo e interno, y detonante, que puede afectar la estabilidad de un talud, si no aquellos más representativos, aplicables y ostensibles para la zona de estudio, en este sentido se define lo siguiente:

- Factores contribuyentes internos, se estudiaron todos aquellos factores inherentes al talud y cuya consecución fue factible mediante los estudios precedentes e información secundaria relacionada, como son las características geológicas, geomorfológicas, geotécnicas, topográficas, hidrogeológicas y de cobertura vegetal.
- Factores contribuyentes externos, hace referencia a la actividad antrópica que prevalece en el área de influencia del Salto del Cabrón: asentamientos humanos por construcción de viviendas.
- Factores detonantes, se analizó mediante modelación computacional la incidencia de la infiltración producto de las precipitaciones en la estabilidad de los taludes de diseño. Se debe aclarar que no se realizó análisis de lluvia crítica.

Los resultados de este estudio muestran los factores contribuyentes y detonantes que más han incidido en el deterioro de la estabilidad del Salto del Cabrón entre los años 2004 y 2017 a partir de los resultados obtenidos del Factor de Seguridad y el cambio de la superficie del talud, con dichos resultados se plantearon soluciones conceptuales al problema inestabilidad que presenta la zona de estudio; por otro lado, éstos también son aplicables a futuras investigaciones que pretendan analizar la estabilidad de taludes en lugares con características similares a las del Salto del Cabrón.



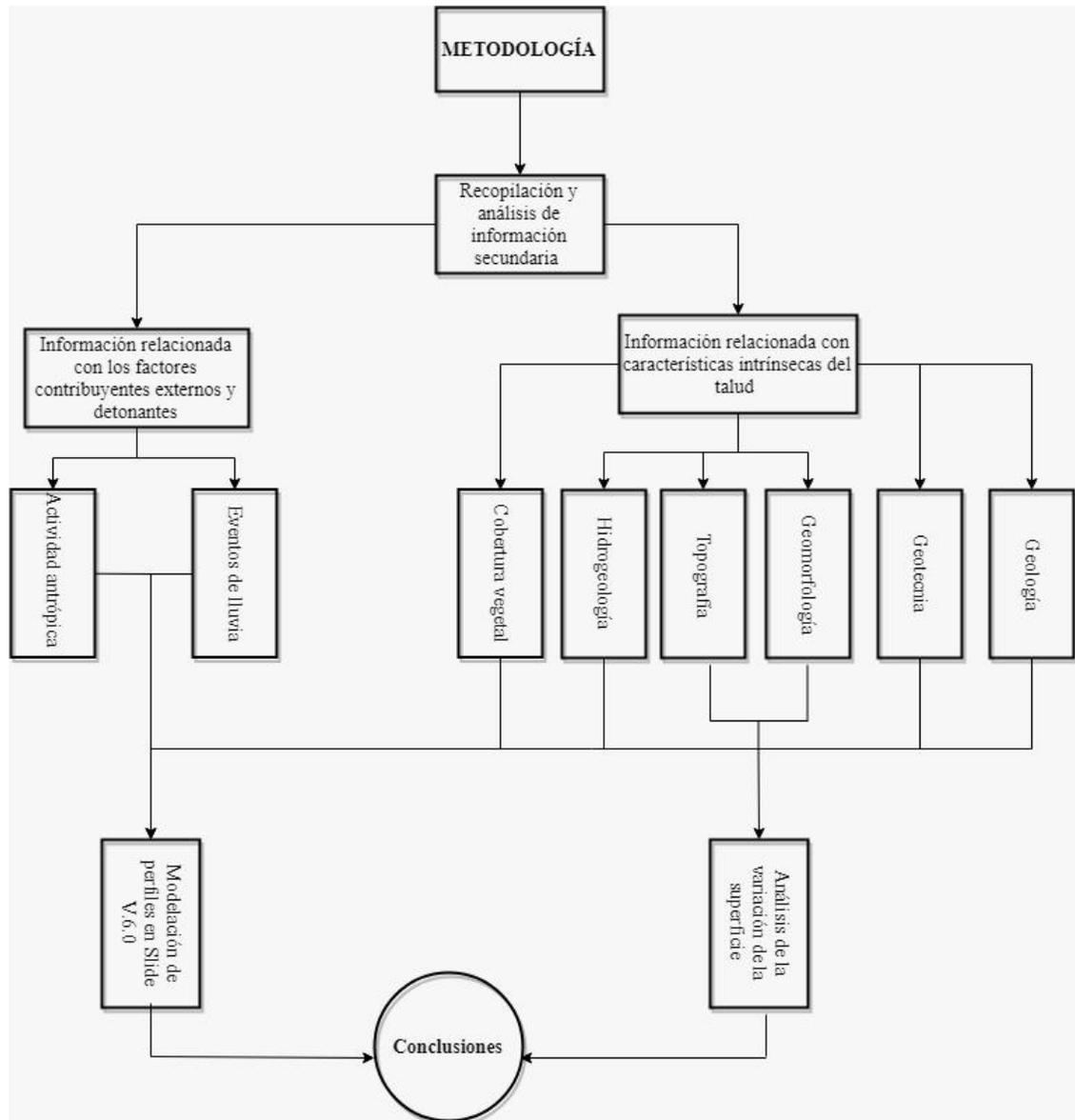
4. METODOLOGÍA

A través de esta investigación se buscó determinar cuáles factores contribuyentes y detonantes han tenido mayor incidencia en la condición de inestabilidad de taludes presentada en el Salto del Cabrón en la ciudad de Cartagena de Indias entre los años 2004 y 2017. La zona de estudio es una formación geológica que se encuentra ubicada en el extremo sur del Cerro de La Popa y posee una extensión aproximada de 12,1 Ha (Universidad de Cartagena, 2009) latitud $10^{\circ}25'8.03''N$, longitud $75^{\circ}31'31.81''O$. La investigación fue llevada a cabo entre los meses de Febrero y Mayo del año 2018.

El presente estudio se caracteriza por poseer un enfoque mixto en dos etapas (cualitativa y cuantitativa). En primer lugar, se tiene el proceso de recopilación de la información secundaria con la finalidad de describir y analizar las características intrínsecas (geología, geomorfología, geotecnia topografía, comportamiento hidrogeológico y cobertura vegetal) y los factores contribuyentes y detonantes (comportamiento de la precipitación y la actividad antrópica) que intervienen en la estabilidad de la zona de estudio de la zona de estudio.

La segunda etapa comprende las modelaciones computacionales que permitan establecer la variación de los factores de seguridad (software Slide V.6.0) y el posible cambio de la superficie del talud (software ArcGIS V.10.1) entre los años propuestos para el estudio y donde se tenga en cuenta la intervención de todos los factores descritos en el párrafos anterior con el fin de cumplir con el objetivo general de la manera más acertada posible. Esta etapa incluye la obtención, ajuste e implementación de los parámetros de entrada requeridos por los programas informáticos, lo cual se explica a detalle en este capítulo.

En la Figura 7 se muestra presenta el esquema de la metodología utilizada para desarrollar el estudio.



*Figura 7. Esquema de la metodología propuesta para el desarrollo del proyecto.
Fuente: autores.*

4.1 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN SECUNDARIA RELACIONADA CON LAS CARACTERÍSTICAS INTRÍNSECAS DEL TALUD DEL SALTO DEL CABRÓN

En este ítem, se extrajo información necesaria de los factores contribuyentes internos en el comportamiento de la estabilidad del talud de la zona de estudio. Dicha información se obtuvo de los informes definitivos realizados por la Universidad de Cartagena en Convenio



con la Alcaldía de la Ciudad de Cartagena de Indias en el sector del Salto del Cabrón (2009 y 2017), y de archivos digitales de investigaciones desarrolladas por agencias adscritas a entidades gubernamentales en la Ciudad y el país, como CARDIQUE e INGEOMINAS.

La caracterización geológica, geotécnica, geomorfológica, topográfica e hidrogeológica se hizo a través de mapas litológicos, archivos de zonificación geológica, planos de perfiles estratigráficos típicos de la zona de estudio, cuadros de resúmenes de apiques y ensayos geotécnicos, relaciones de procesos morfodinámicos, planos topográficos de los años 2009 y 2017 y modelos teóricos del comportamiento hidrológico del suelo del talud.

La descripción del comportamiento y deterioro de la vegetación del talud se hizo mediante planos de cobertura vegetal realizados por Universidad de Cartagena en 2009 y 2017 e imágenes de Google Earth Pro entre los años 2005 y 2018.

4.2 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN SECUNDARIA RELACIONADA CON LOS FACTORES CONTRIBUYENTES Y DETONANTES EN EL SALTO DEL CABRÓN

Se realizó a través de información obtenida de la Alcaldía de Cartagena, encuestas realizadas por la Universidad de Cartagena en 2009 y fotografías satelitales de Google Earth Pro, un análisis de la evolución de la actividad antrópica relacionada con los asentamientos por viviendas, desde los años 60 hasta la actualidad, en el área de influencia del Salto del Cabrón.

También se caracterizó estadísticamente la precipitación anual y mensual que ocurre en Cartagena con base en información histórica desde el año 1941 hasta el 2017, registrada por la estación meteorológica Aeropuerto Internacional Rafael Núñez y suministrada por el IDEAM, con el fin de determinar la lluvia de diseño y su respectiva infiltración implementada en la modelación con el Software Slide V.6.0.

4.3 MODELACIÓN DE LA ESTABILIDAD E INFILTRACIÓN EN EL TALUD

A continuación se presenta el procedimiento desarrollado para la modelación de los taludes típicos del Salto del Cabrón en Slide V.6.0, donde se implementó el método de equilibrio



límite para el problema de la inestabilidad y los métodos de coeficiente de presión de poros (Ru) y elementos finitos para simular la infiltración por efecto de las lluvias en el talud.

4.3.1 Combinación de escenarios de estabilidad

Para simular las condiciones reales de la zona estudio, en las que se tuviera en cuenta todos los factores contribuyentes y detonantes ya mencionados, se realizaron en total 32 modelaciones que resultaron de las combinaciones de los distintos escenarios de estabilidad descritos en los numerales 4.3.1.1 y 4.3.1.2 que fueron aplicados a los tres perfiles de diseño.

4.3.1.1 Perfiles sin infiltración

- perfil en condiciones “ideales” (no se tiene en cuenta la aceleración sísmica, la infiltración producida por la lluvia ni la sobrecarga por asentamientos).
- Perfil con sobrecarga (con sobrecarga por asentamiento en el Convento, pero sin aceleración sísmica ni infiltración)
- Perfil con sobrecarga y sismo (con aceleración sísmica y sobrecarga por asentamiento en el Convento, pero sin infiltración)
- Estabilidad en las faldas del talud (se analiza la estabilidad sólo en las partes bajas del perfil, entre las cotas 36 a la cero).
- Estabilidad en las faldas del talud con sobrecarga (se analiza la estabilidad sólo en las partes bajas del perfil, con aplicación de sobrecarga por viviendas).
- Estabilidad en las faldas del talud con sobrecarga y con sismo (se analiza la estabilidad sólo en las partes bajas del perfil, con aplicación de sobrecarga por viviendas y con sismo).

4.3.1.2 Perfiles con infiltración

- Perfil con sobrecargas e infiltración (con sobrecarga por asentamiento en el Convento e infiltración por lluvias de los años 2004, 2007, 2010 y 2017)
- Perfil con sobrecargas, infiltración y sismo (con sobrecarga por asentamiento en el Convento, aceleración sísmica e infiltración por lluvias de los años 2004, 2007, 2010 y 2017)



4.3.2 Obtención de la geometría y parámetros de entrada requeridos por el software Slide V.6.0

- **Perfiles topográficos y estratigráficos típicos**

En la Figura 9, la Figura 10 y la Figura 11, se muestran tres de los perfiles típicos definidos por la Universidad de Cartagena en el año 2017, los cuales se han seleccionado para la modelación en el software Slide V.6.0. En los perfiles 1 y 2 se evaluó la estabilidad con y sin incidencia de la infiltración, la incidencia de la sobrecarga vertical producida por el Convento de Los Agustinos Recoletos (en la cima del talud) y las viviendas (falda del talud). Sin embargo en el perfil 3 sólo se evaluó la estabilidad sin infiltración, y la sobrecarga vertical sólo se aplicó en la parte baja, debido a que éste no atraviesa el estrato de calizas definido como zona potencial de recarga y lugar donde se ubica el convento (ver Figura 8).

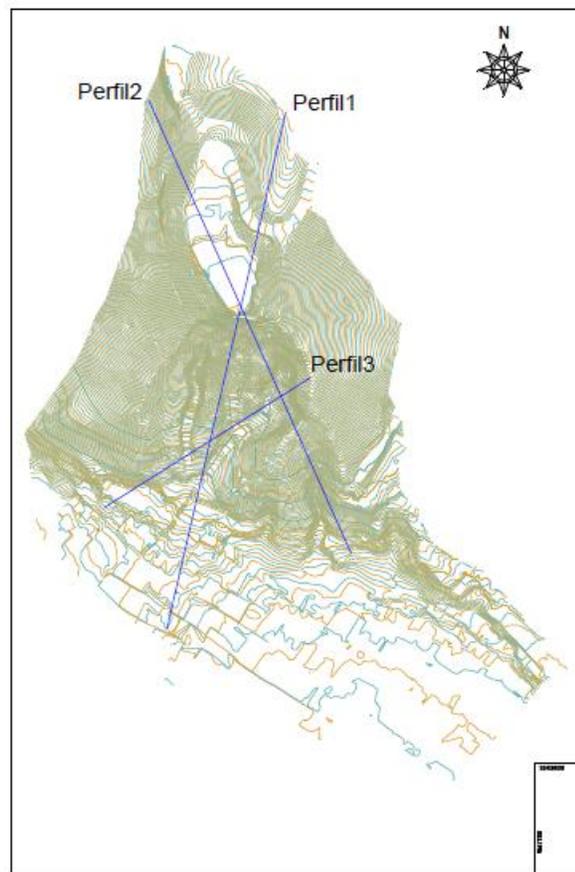


Figura 8. Localización de los perfiles de diseños en la topografía general.
Fuente: (Universidad de Cartagena, 2017) y modificado por los autores.

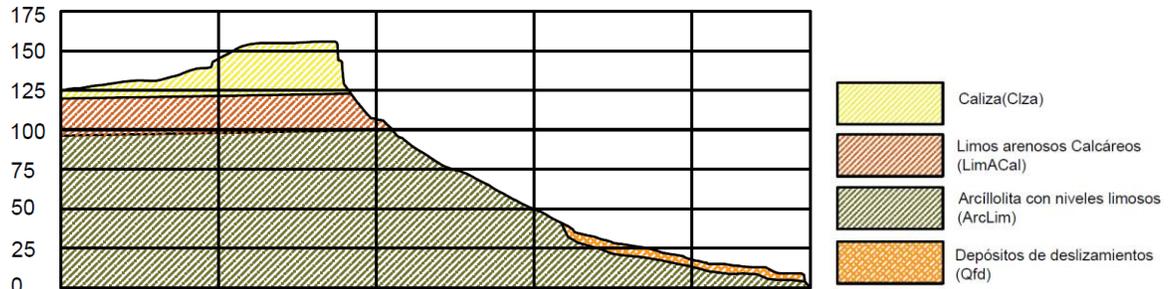


Figura 9. Perfil de diseño número 1.

Fuente: (Universidad de Cartagena, 2017) y modificado por los autores.

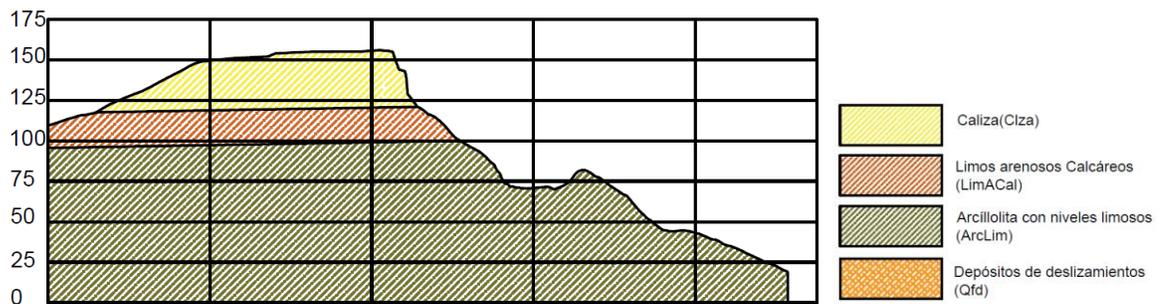


Figura 10. Perfil de diseño número 2.

Fuente: (Universidad de Cartagena, 2017) y modificado por los autores.

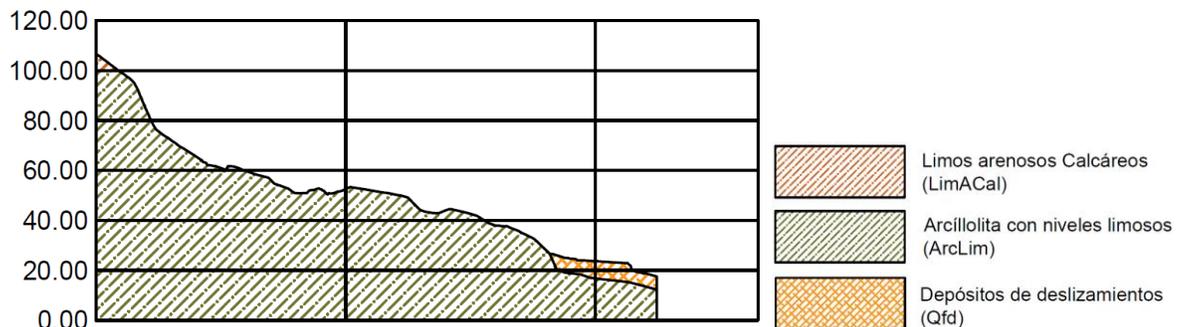


Figura 11. Perfil de diseño número 3.

Fuente: (Universidad de Cartagena, 2017) y modificado por los autores.

- **Parámetros para el análisis de estabilidad**

A partir de la caracterización geológica y geotécnica desarrollada en la primera parte de los resultados, se definieron los parámetros de peso específico (kN/m^3), cohesión (kN/m^2) y ángulo de fricción interna ($^\circ$) específicos para cada estrado del perfil.

También se definió la carga de aceleración sísmica según los valores de la aceleración pico efectiva (A_a) y de la velocidad pico efectiva (A_v) que son ambos casos iguales a 0,1 para la



ciudad de Cartegena, de acuerdo con la tabla A.2.3-2 de la Norma Sismo Resistente colombiana NSR-10 (ver Anexo 15). Para el Av, sin embargo, se asume solo un 66,6% del valor total, teniendo en cuenta los estudios realizados por Newmark y otros, donde se encontró que la aceleración vertical es aproximadamente $2/3$ de la aceleración horizontal (Tiziano Perea, 2005).

De igual forma, las sobregarcas verticales producto de los asentamientos humanos, se definieron como 1 a 2 ton/m² para las viviendas y 5,4 ton/ m² para el convento de Los Agustinos Recoletos ubicado en la cima del talud. Los metodos de equilibrio limite utilizados fueron los de Bishop simplificado, Janbú simplificado y Morgentern – Price.

- **Parámetros de entrada para el análisis de agua subterránea (infiltración)**

Se estimaron los coeficientes de presión de poros (R_u) para cada estrato del perfil según el comportamiento hidrogeológico y el grado de saturación de cada uno de estos, con valores posibles entre 0 y 1, siendo 1 la condición más crítica que representa la saturación total del suelo.

Para calcular la infiltración en la zona potencial de recarga (estrato calcáreo en la cima del talud), se empleó el modelo propuesto por Schosinsky, teniendo en cuenta la lluvia de diseño (precipitaciones de mayo a noviembre), los mapas de pendientes del talud, el porcentaje y tipo de cobertura vegetal y la permeabilidad (K) intrínseca de la zona de recarga.

De igual forma, para obtener el parámetro de permeabilidad saturada (K_s) necesario para el análisis, se adaptó el modelo de Van Genutchen, para lo cual se precisó datos como el grado de saturación del suelo, la porosidad y la permeabilidad (K) del mismo. En ese sentido se consideró necesario realizar un ensayo in situ de permeabilidad para la zona potencial de recarga, puesto que éste no se realizó en los estudio de referencia previos.

Para realizar el ensayo de permeabilidad (ver Figura 12), se siguió la metodología de *permeabilidad de cabeza variable* propuesto por Lefranc (1986). Se excavó un agujero de aproximadamente 4 pulgadas de diámetro y 55 centímetros de profundidad, posteriormente se introdujo un tubo de plástico de 1 m de altura y 2 pulgadas de diámetro y se rellenó a su



alrededor con parte del material excavado, compactado un poco de manera manual; esto con el fin de lograr que la infiltración se diera en forma completamente vertical y no por las paredes del suelo.

Luego, se llenó el tubo con agua hasta rebosar y se esperó que esta descendiera completamente hasta el final del agujero, pasada una hora (tiempo estipulado para la saturación), se llenó el tubo con agua nuevamente hasta rebosar y se tomó la lectura de cuántos centímetros descendía el agua cada 60 segundos, durante 15 minutos. Se ensayaron 2 agujeros tal como lo sugiere Lefran (1986).



Figura 12. Ensayo de permeabilidad in situ en la zona de recarga potencial.
Fuente: autores.



4.3.3 Modelación de los perfiles típicos del Salto del Cabrón en Slide V.6.0

- **Importación de la geometría de los perfiles típicos**

Se importaron los perfiles típicos (ver Figura 13) definidos en la sección anterior directamente desde AutoCAD en un formato DXF, el software permite incorporar bordes internos (“External Boundary”) e internos (“Material Boundary”) del perfil, de tal manera que la geometría del mismo queda perfectamente definida con sus fronteras externas e internas (estratos de suelo).

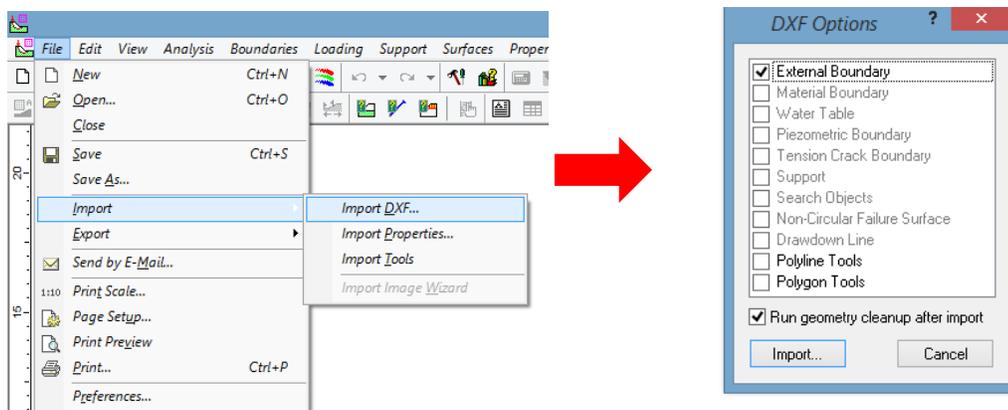


Figura 13. Importación de bordes, de AutoCAD al programa Slide V.6.0.

- **Configuraciones del proyecto**

Con la herramienta “Analysis” >> “Project Settings” se define la configuración general (“General”) del modelo, donde se precisan las unidades de fuerza, las unidades de tiempo, las unidades de permeabilidad y la dirección de la falla (ver Figura 14). En el apartado “Methods” se definen los métodos de equilibrios límites utilizados para el cálculo de los factores de seguridad (ver Figura 15). Posteriormente, en la sección “Groundwater” se incorporan los métodos de coeficiente de presión de poros (Ru) en combinación con un análisis de elementos finitos que estudiará el comportamiento del agua transitoria dada por la infiltración (ver Figura 16).



Finalmente con la opción “Transient” se define el número total de etapas de mayo a noviembre (mes 5 a mes 11) en las que se dividió la lluvia de diseño para que el factor de seguridad sea calculado en cada una de ellas (ver Figura 17).

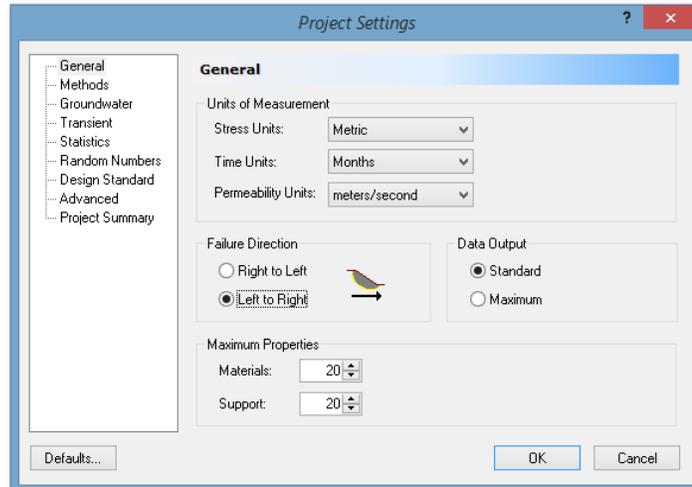


Figura 14. Configuración general del proyecto en Slide V.6.0.

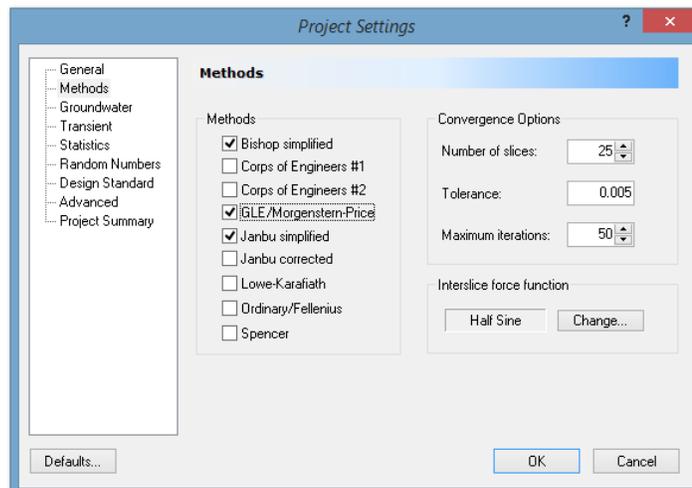


Figura 15. Selección del método de equilibrio límite en Slide V.6.0.

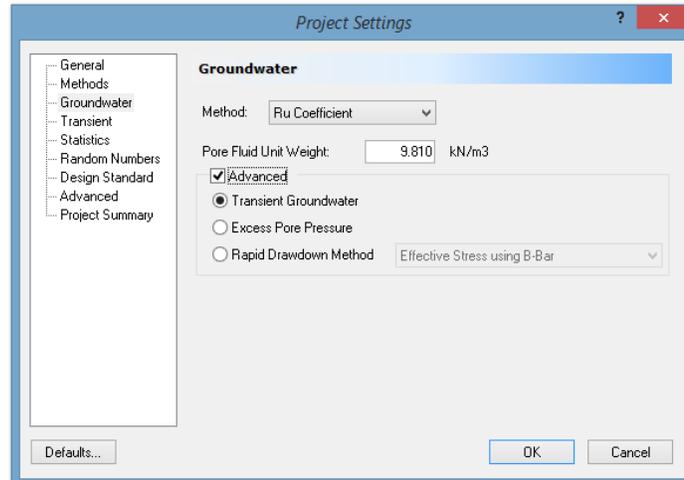


Figura 16. Selección del método de análisis de agua subterránea en Slide V.6.0.

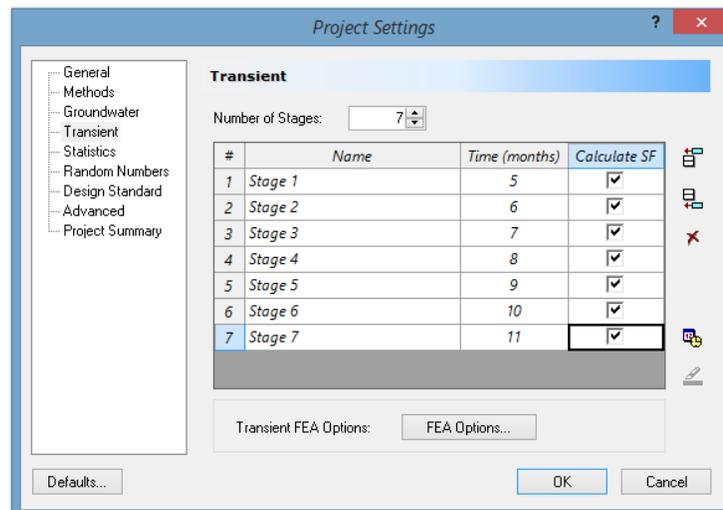


Figura 17. Etapas de análisis de infiltración en Slide V.6.0.

- **Definición de las propiedades de cada unidad estratigráfica**

Con la herramienta “Define material Properties” se introdujeron los parámetros de peso específico, cohesión, ángulo de fricción interna y coeficiente de presión de poros (Ru) para cada estrato (ver Figura 18).

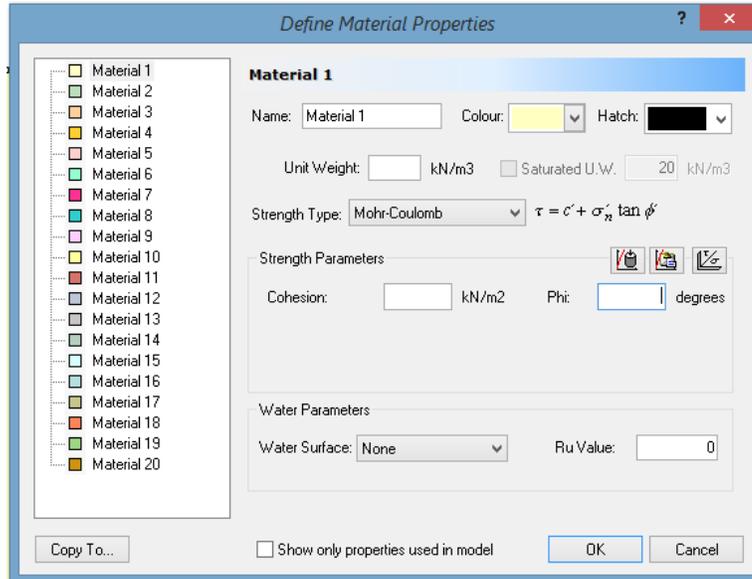


Figura 18. Definición de los parámetros geotécnicos de entrada en Slide V.6.0.

- **Incorporación de las sobrecargas y la carga de aceleración sísmica**

Con la herramienta “Loading” >> “Add Distributed Load” se incorpora la sobrecarga vertical prevista para las viviendas al pie del talud y el convento en la cima del mismo. De igual forma, con la opción “Seismic Load” se proporcionan los parámetros aceleración pico efectiva A_a (horizontal) y de la velocidad pico efectiva A_v (vertical) propios de la zona de estudio (ver Figura 19 y Figura 20).

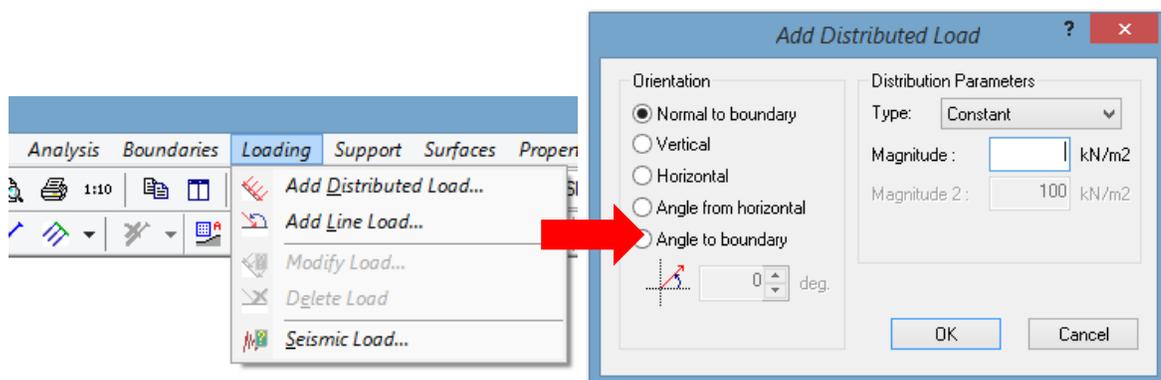


Figura 19. Incorporación de cargas distribuidas en Slide V.6.0.

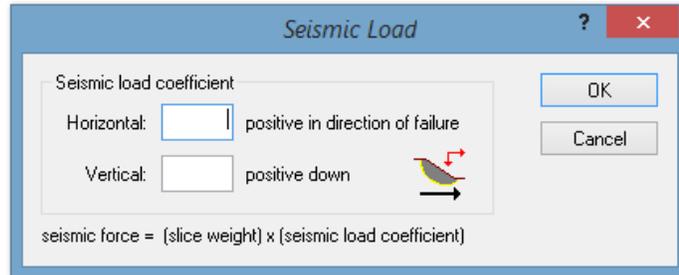


Figura 20. Incorporación de carga sísmica en Slide V.6.0.

- **Creación de la malla y discretización de los elementos finitos**

Con la herramienta “Mesh” >> “Mesh Setup” se establece el tipo de elemento que divide la malla, en este caso se ha optado por elementos triangulares de 3 nodos y un número aproximado de elementos igual a 1500, debido a que es la opción que ofrece mayor resolución a la hora de obtener resultados (Figura 21).

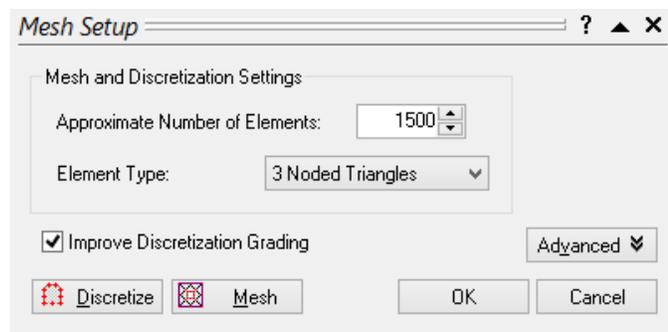


Figura 21. Configuración de la malla de elementos finitos en Slide V.6.0.

- **Definición de las propiedades hidráulicas**

Mediante la herramienta “Define Hydraulic Properties” (ver Figura 22) se define el parámetro de conductividad hidráulica K_s en m/s, además se especifica la isotropía del material ($K_2/K_1 = 1$), que indica que la conductividad hidráulica primaria K_1 y la secundaria K_2 son iguales, es decir este factor va a ser igual en cualquiera de las dos direcciones (x o y) del modelo.

Por otra parte, el ángulo K_1 es el ángulo que especifica la dirección de la permeabilidad de K_1 . El ángulo K_1 se especifica con relación a la dirección positiva X (horizontal), como lo



indica la imagen en el cuadro de diálogo (Slide Rocscience 2018). Por ultimo “WC” indica el contenido de agua en que contiene el material (humedad natural).

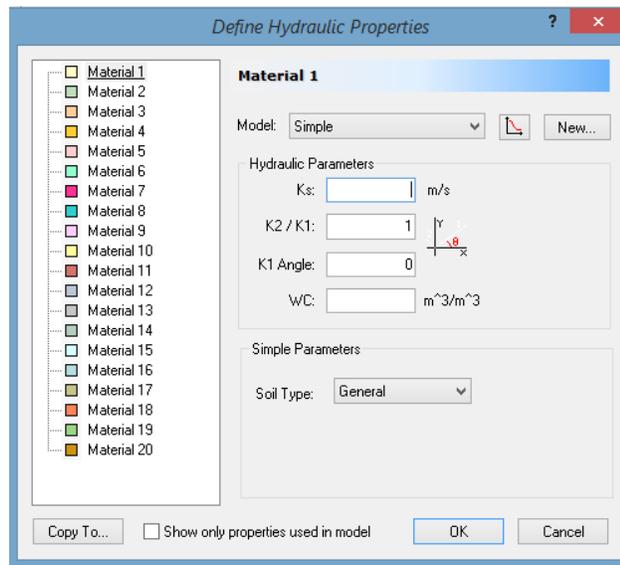


Figura 22. Definición de las propiedades hidráulicas en Slide V.6.0.

- **Definición del flujo estacionario y transiente**

En la herramienta para flujo estacionario “Set Boundary Condition” (ver Figura 23), se define la condición de flujo inicial, es decir una infiltración de cero metros por mes en el instante cero, luego se incorpora el flujo “transiente” mediante la función definida por el usuario que relaciona el tiempo en meses con la infiltración en metros/ mes (ver Figura 24).

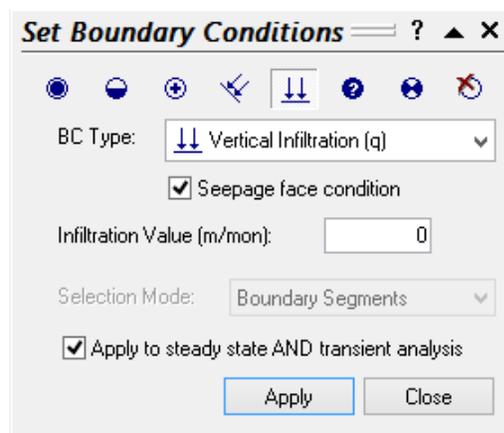


Figura 23. Condición inicial de flujo en Slide V.6.0.

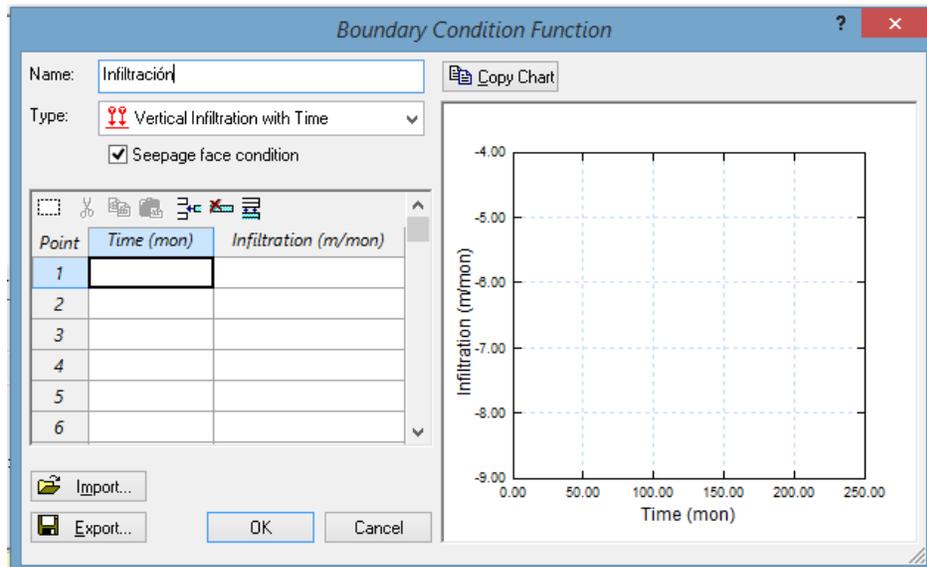


Figura 24. Definición del flujo transitorio en Slide V.6.0.

4.3 MODELACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA SUPERFICIE DEL TALUD EN EL SOFTWARE ARCGIS V.10.1

A continuación, se muestra el procedimiento desarrollado en el software ArcGIS V.10.1 para la modelación de la superficie del Salto del Cabrón en los años 2004, 2009 y 2017, a fin de determinar si ésta presenta cambios significativos.

- **Importación de la topografía de la zona estudiada**

A través del menú Archivo (“file”), se abre un nuevo proyecto (“New” >> “Getting Starded” >> “New Maps” >> “Blank Map”), en el que quedarán importadas las curvas de nivel de la topografía en formato DWG.

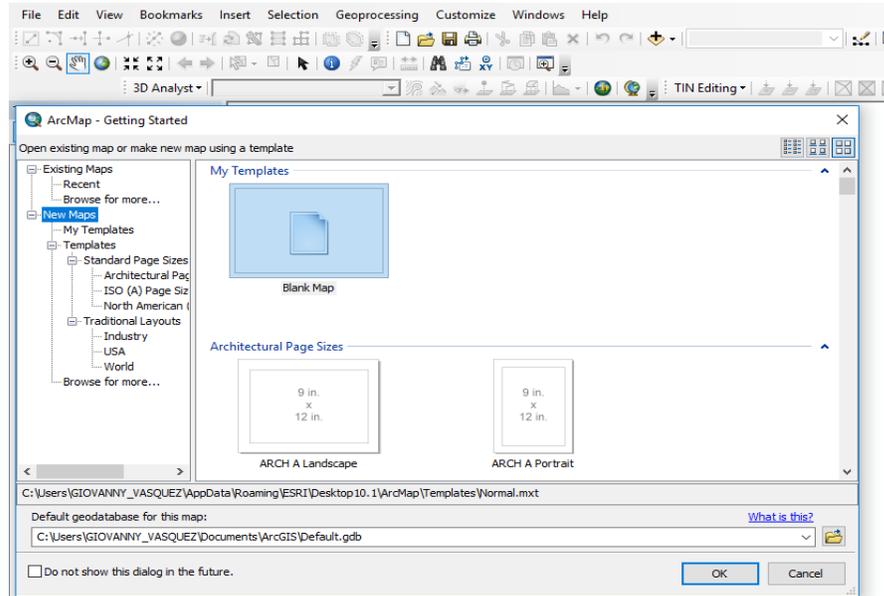


Figura 25. Creación de nuevo proyecto en ArcGIS V.10.1.

Posteriormente, se conecta la carpeta donde se guardará todo lo referente al nuevo proyecto al programa de ArcGIS V.10.1 a través de la herramienta Catálogo (“Catalog” >> “Connect to folder”), y se arrastra las curvas de nivel a la tabla de contenido del programa (“table of contents”). Se deja activas sólo las polilíneas.

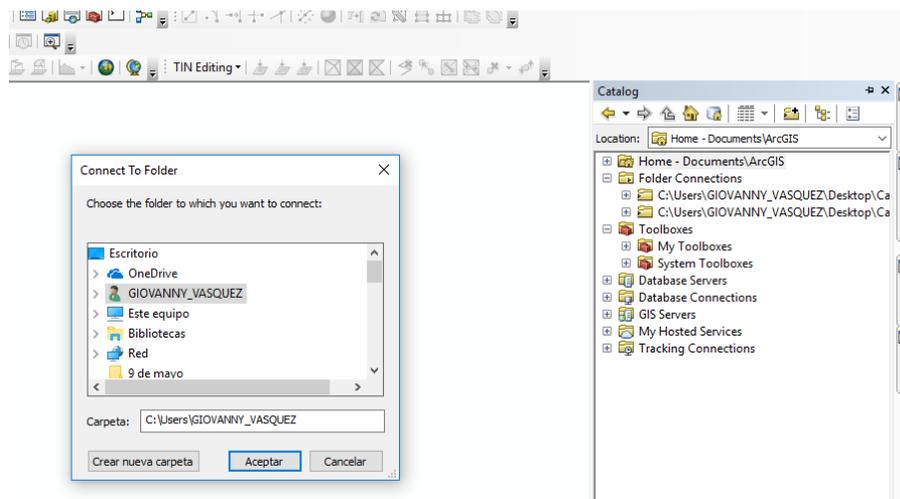


Figura 26. Conectar la carpeta del proyecto al programa ArcGIS V.10.1.

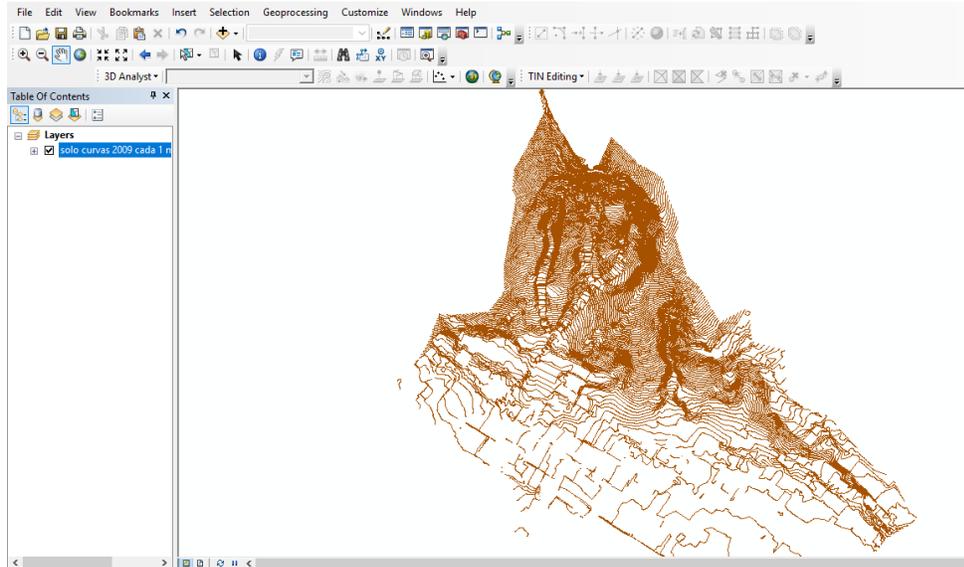


Figura 27. Topografía importada en ArcGIS V.10.1

- **Creación de datos de salida**

Dando clic derecho a las curvas de nivel en polilíneas, se crean los datos de salidas (“Export data”) y transforma las curvas de nivel al formato “ShapeFile”, que será el formato que leerá el programa para generar la superficie TIN, los datos Ráster y el mapa de pendientes.

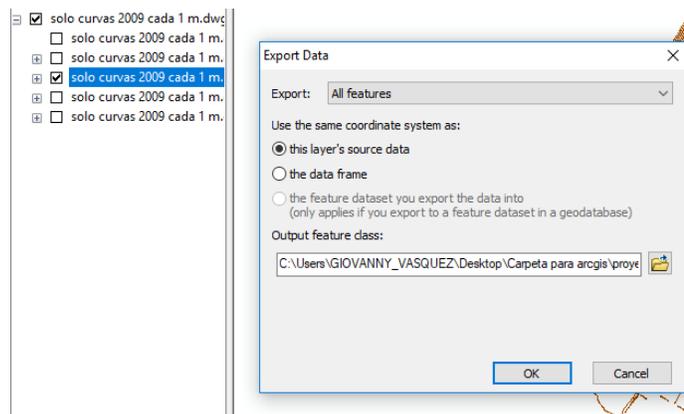


Figura 28. Creación de carpeta de datos de salida.

- **Creación de la superficie TIN**

Con la caja de herramientas de Arcgis (“Arctoolbox”) se crea la superficie de red irregular de triángulos (TIN) (“ArcTollbox” >> “3D Analys Tools” >> “Data Management” >> “TIN” >> “Create TIN”).



Los datos necesarios para crear la superficie TIN son: la carpeta del escritorio donde esta será almacenada (“Output TIN”), el sistema de coordenadas (“Coordinate System”), los datos de salida o ShapeFile (“Input Feature Class”), la evaluación de todo el archivo que será a través de la elevación (“Height Field”>> “Elevation”) y la característica de la superficie (“SF Type”>> “Soft_Line”).

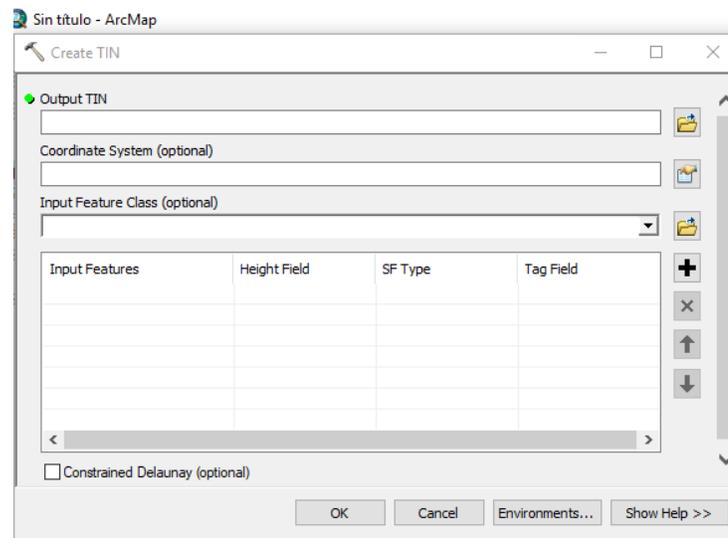


Figura 29. Creación de la superficie TIN.

- **Convertir la superficie TIN a Raster**

Con la caja de herramientas de Arcgis (“Arctoolbox”), se convierte la superficie TIN a una matriz de celdas o píxeles organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula), que son los datos Raster (“ArcToolbox” >> “3D analyst Tools” >> “Conversion” >> “From TIN” >> “TIN to Raster”).

Los datos necesarios para convertir la Superficie TIN a datos Raster son: la superficie TIN (“Input TIN”), la carpeta del escritorio donde serán almacenados los datos Raster (“Output Raster”), y el tamaño de las celdas (“Sampling Distance” >> “CellSize”).

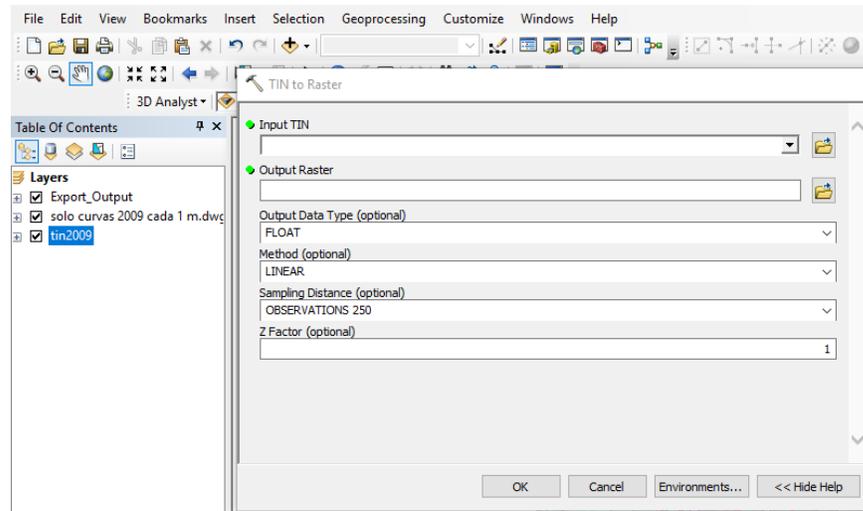


Figura 30. Convertir superficie TIN a datos Raster.

- **Creación de mapas de pendientes**

Con la caja de herramientas de Arcgis (“Arctoolbox”), se crea el mapa de pendientes (“Arctoolbox” >> “3D analyst Tools” >> “Raster Surface” >> “Slope”).

Los datos necesarios para realizar el mapa de pendientes son: la superficie Raster (“Input raster”), la carpeta del escritorio donde será almacenado el mapa de pendientes (“Output raster”) y cómo será el cálculo de la pendiente, que en este caso será en grados (“Output measurement” >> “DEGREE”).

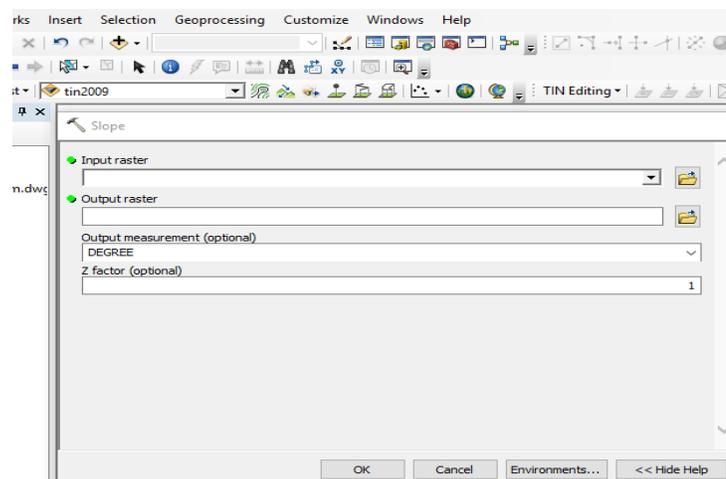


Figura 31. Convertir superficie TIN a datos Raster.



- **Restar los datos Raster**

Después de haber hecho el procedimiento anterior en cada una de las topografías de los años 2004, 2009 y 2017, con la caja de herramientas de Arcgis (“Arctoolbox”), se realiza la diferencia entre dos datos Raster (“Arctoolbox” >> “Spatial Analyst Tools” >> “Map Algebra” >> “Raster Calculator”). Se debe especificar la carpeta en el escritorio donde se guardará la superficie Raster producto de la resta (“Output Raster”). Finalmente, la nueva superficie Raster se le genera el mapa de pendientes, cuyo procedimiento está descrito anteriormente.

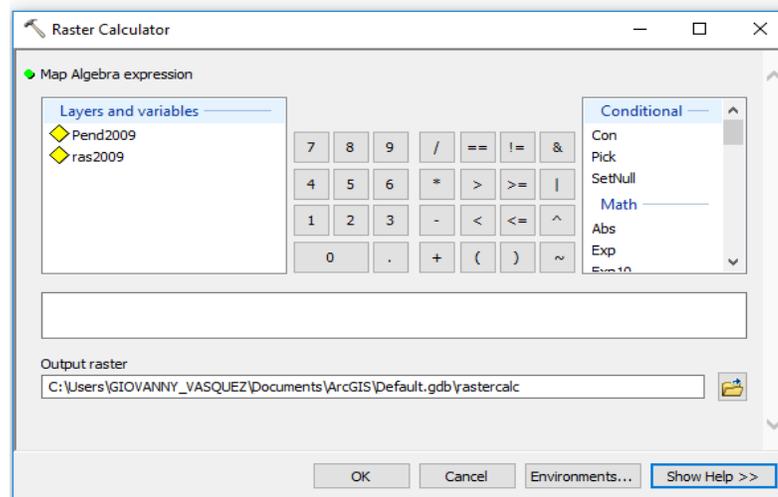


Figura 32. Resta de raster en ArcGIS V.10.1.



5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

REFERENTE A FACTORES INTRÍNSECOS DEL SALTO DEL CABRÓN

5.1.1 Caracterización geológica, geotécnica, geomorfológica y topográfica del Salto del Cabrón

En la Tabla 10 se muestra una recopilación de las características geológicas, geotécnicas, geomorfológicas y topográficas del Salto del Cabrón. En este se destaca que la zona de estudio hace parte de la formación Popa, que corresponde a la unidad geológica más joven del Cinturón del Sinú. Discordantes sobre dicha formación se encuentran los depósitos Coluviales y aluviales. Los terrenos asociados al Cinturón del Sinú surgen a partir de la interacción tectónica de las placas Caribe y Suramérica (INGEOMINAS, 2001).

También se muestran cinco unidades litológicas comprendidas por las Calizas coralinas, los Limos arenosos calcáreos, las Arcillolitas con niveles limosos, los Depósitos de deslizamiento y el Coluvión calcáreo. Las pendientes del talud varían entre 0 y 15% en el estrato de calizas y se hacen más empinadas en los estratos intermedios (limos y arcillolitas) donde se presentan valores que comúnmente superan el 30%, las faldas del talud (depósitos de deslizamientos) presentan pendientes de entre 5 y 15%. Actualmente persistentes procesos morfodinámicos como escarpes, surcos y cárcavas que denotan en una susceptibilidad a deslizamientos de moderada a alta.

Las unidades y subunidades Gemorfológicas encontradas en el Salto del Cabrón son de tipo morfoestructural y denudacional, es decir, geoformas generadas a partir de la combinación de procesos endógenos (internos) y exógenos (externos), los cuales crean cambios significativos sobre la superficie. El tectonismo es el encargado de desarrollar las formas del relieve más relevantes y el agua en forma de lluvia y de escorrentía superficial es el agente principal en los procesos erosivos que se desarrollan. (INGEOMINAS, 2012).



Tabla 10. Caracterización geológica, geotécnica, geomorfológica y topográfica del Salto del Cabrón.

ÁREA DE ESTUDIO	UBICACIÓN GEOLÓGICA LOCAL	EDAD GEOLÓGICA	UNIDAD GEOLÓGICA	ZONA	UNIDAD LITOLÓGICA	GEOFORMA PREDOMINANTE	PROCESOS MORFODINÁMICOS PRESENTES	SUSCEPTIBILIDAD A PROCESOS DENUTATIVOS	PENDIENTES (°)	CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS							
Cerro de la Popa sector Salto del Cabrón	Cinturón del Simí	Terciario: Plioceno superior Pleistoceno	Formación Popa (Qpp)	I	Calizas Coralinas (CIZa)	Ladera estructural de cuesta (Scle)	Caído de bloques Escarpes Erosivos	Baja De moderada a alta	0-15 (baja a media) >30 (alta a muy alta)	Porosidades alrededor del 30%, pesos unitarios alrededor de 2 Ton/m ³ , resistencia a la compresión entre 1700 y 3000PSI.							
											II	Limos arenosos Calcáreos (LimACal)	Cicatriz de erosión y deslizamiento (Dced)	Cárcava Caído de bloques Escarpes de deslizamiento	Alta	>30 (alta a muy alta)	Suelos residuales representados por limos pardos de baja plasticidad, arcillas pardas de media plasticidad con lentes arenosos. Presentan IP entre 7% y 23%, Wn entre 5% y 25%, porcentaje que pasa por el tamiz #200 entre 61% y 95%, C entre 6 y 9 Ton/m ² y Φ entre 15 y 23° obtenidos por ensayo de corte directo, Cu entre 6 y 13 Ton/m ² por ensayo de compresión confinada no drenada.
			IV	Depósitos de deslizamiento (Qfd)	Conos de deslizamiento y avalancha (Dcav)	Escarpes de deslizamiento	De baja a moderada	0-30 (baja a moderada)	Acumulaciones de gravas, material areno-arcilloso y limoso de baja a media plasticidad. Se presentan IP entre 4% y 25%, Wn entre 8% y 34%, % que pasa por el tamiz #200 entre 38% y 98%, γt entre 1,8 y 2,1 Ton/m ³ , C entre 3 y 10 Ton/m ² y Φ entre 16 y 25° obtenidos por ensayo de corte directo, Cu entre 50 y 100 Ton/m ² obtenidos por ensayo compresión confinada no drenada.								
										V	Coluvión Calcáreo (ClvCa)	Ladera de contrapendiente de cuesta disecada (Sccpd)	Escarpes erosivos	Moderada	5-15 (moderada)	Depósitos de coluviones y movimientos en masa. Conformado por bloques de Caliza arrecifal, con matriz intersticial de arenas arcillosas calcáreas. Presenta Wn entre 4% y 23%, C entre 7 y 15 Ton/m ² y Φ de 16°.	
																	Colina (C)
		Coluvión (Co)	Paleoocantilados (Mpa)	Escarpes erosivos Escarpes de deslizamiento Surcos	De moderada a alta	>30 (alta a muy alta)											

Fuente: modificado de (INGEOMINAS, 2001), (INGEOMINAS, 2012), (Murcia Cañón & Carvajal Perico, 2017), (Universidad de Cartagena, 2009), y (Universidad de Cartagena, 2017).



Entre las subunidades Geomorfológicas (ver figura 33) se destacan las laderas estructurales (superficies con pendientes suaves con los estratos inclinados a favor de la pendiente), las laderas de contrapendiente (con los estratos en contra de la pendiente del terreno, de longitud larga y en forma cóncava), conos coluviales (producto de la acumulación de materiales con pendientes leves a moderadas), Cicatriz de procesos denudativos (causada por el desplazamiento de material hacia afuera y debajo de la ladera), lomos denudacionales (franjas alargadas que se han mantenido a pesar de los episodios de deslizamiento y procesos erosivos) y paleoacantilados (escarpes que representan antiguas líneas de costa, de forma triangular).

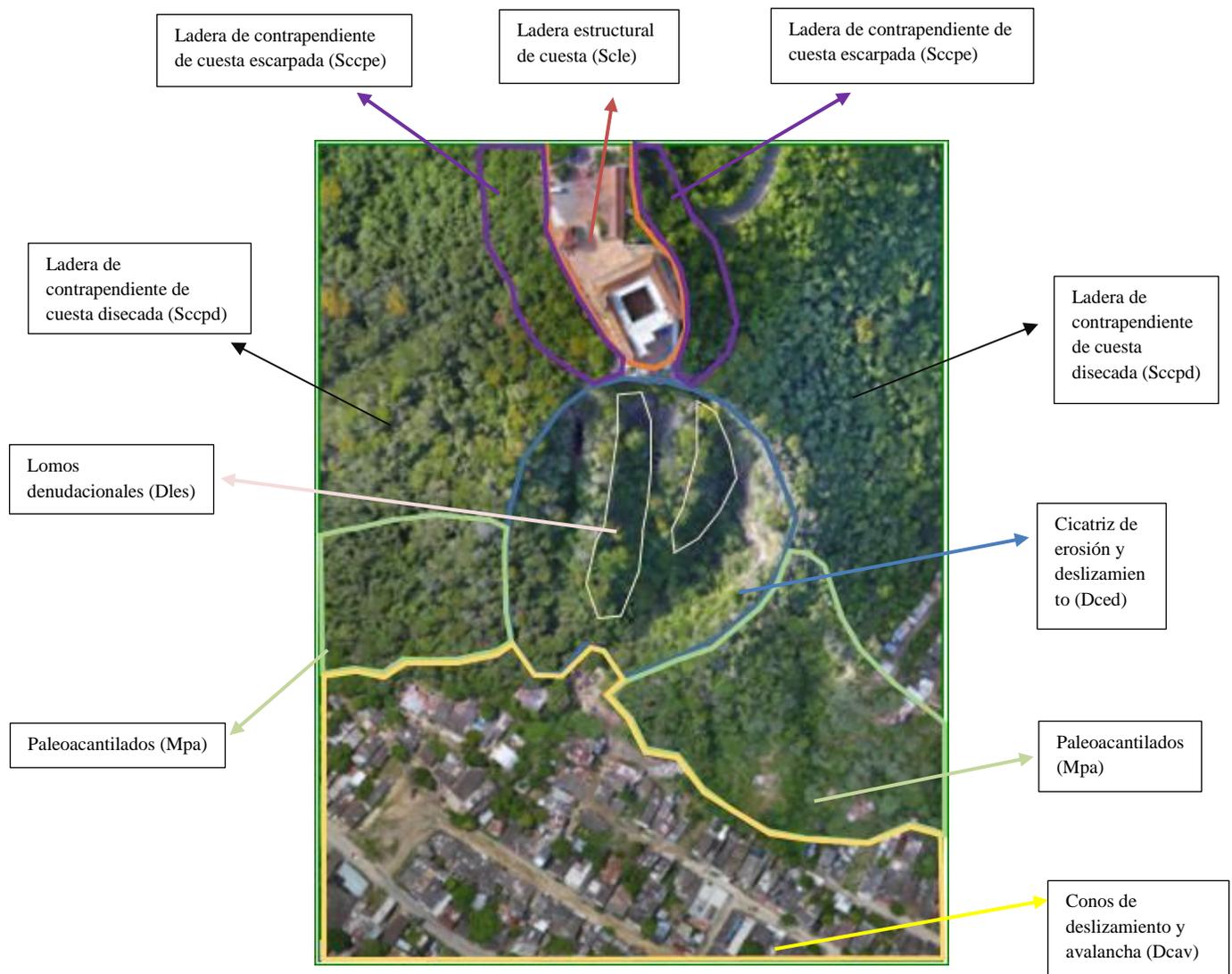


Figura 33. Unidades geomorfológicas del Salto del Cabrón.
Fuente: autores.



A continuación, se muestran las convenciones utilizadas para definir algunos de los parámetros geotécnicos presentes en la Tabla 10.

Tabla 11. *Convenciones utilizadas para definir los parámetros geotécnicos del talud*

CONVENCIONES	
IP	Índice de plasticidad
W _n	Humedad natural
C	Cohesión
C _u	Cohesión en estado inconfinado no drenado
Φ	Ángulo de fricción interna
γ _t	Peso específico húmedo

Fuente: autores.

5.1.2 Comportamiento hidrogeológico del Salto del Cabrón

5.1.2.1 Unidades hidrogeológicas locales

Los autores del estudio de referencia de 2017, a partir de los resultados de los ensayos de tomografías eléctricas, los datos de la prospección geológica de campo e información secundaria definieron las siguientes unidades hidrogeológicas:

- **Acuitardo de Calizas**

Estas zonas cuentan con pendientes bajas (<5 grados) que favorecen la infiltración. Esta unidad está constituida por calizas arrecifales, de grano fino, en algunas partes compactas y duras, se estima un espesor máximo de 30 metros para esta unidad. En ciertos sectores, se observa fracturada y con alto nivel de porosidad. Se considera que podría conformar un acuífero por porosidad secundaria, continuo y con extensión local, dependiendo de la densidad y continuidad del fracturamiento y porosidad asociada. Su relación es tipo libre.

De acuerdo a lo anterior, este estrato fue definido como la zona de recarga potencial por infiltración para la modelación computacional en el Software Slide V.6.0



- **Acuitardo de Limos arenosos calcáreos**

Conforma la parte media de la ladera, está constituida por areniscas arcillosas de grano muy fino con niveles limosos calcáreos. Se estima que se comportaría básicamente como un acuitardo, es decir como una formación que aunque puede contener agua, la trasmite muy lentamente.

- **Acuicludo de Arcillolitas inferiores con niveles limosos**

Está constituido por la unidad de Arcillolitas y Limolitas inferiores, predominantemente materiales arcillosos, tienen un espesor mayor de 100 metros y hace parte del conjunto inferior de la Unidad detrítica de la Popa. En términos generales esta unidad se puede clasificar como un acuicludo, la cual puede almacenar agua en algunas cantidades pero no tiene la capacidad de transmitirla y se drenan con mucha dificultad.

5.1.2.2 Comportamiento del flujo en el modelo hidrogeológico

Por último, la Universidad de Cartagena en 2017, definió dos mecanismos posibles del comportamiento del flujo en el modelo hidrogeológico del Salto del Cabrón (ver Figura 34):

- Dentro de los niveles superiores se da un flujo preferencialmente vertical de las aguas que se infiltran en la superficie de la caliza, que lentamente llega hasta el contacto con el nivel de limolitas calcáreas y el nivel de arcillolitas inferiores. Allí la acumulación del flujo aumenta la humedad y eventualmente éste se mueve hasta que el agua surja a la superficie.
- Puede presentarse un mecanismo de flujo más rápido asociado a la existencia de discontinuidades como fracturas o disolución de carbonatos en la zona más superficial de la Formación La Popa, estas discontinuidades se constituyen en caminos de flujo preferenciales. También pueden existir sitios puntuales de almacenamiento, que en temporadas de lluvias descargan a superficie producto del ingreso de agua de precipitación.

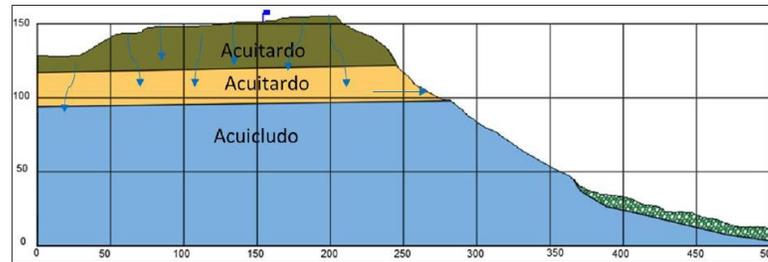


Figura 34. Perfil geológico con esquema del flujo de agua subterránea a partir de la zona de recarga en la caliza superior definido por la Universidad de Cartagena (2017).

5.1.3 Cobertura vegetal del Salto del Cabrón

La mayor parte de la vegetación del Cerro de La Popa es de clase mesoxerofítica (especies vegetales adaptadas a ambientes secos). La vegetación existente es principalmente arbustiva y herbácea, predominando árboles de mayor tamaño en la parte superior del cerro (GEU, 2010). Las especies dominantes son matorrales, trupillo, bicho, aromo y platanillo, las cuales se caracterizan por tener raíces poco profundas y tallo delgado, con hojas caducifóleas que en período de verano se caen, dando un aspecto desolado al paisaje (INGEOMINAS, 2001).

A partir del mapa de cobertura vegetal generado por la Universidad de Cartagena en 2009 (ver Anexo 2) y la distribución de la red urbana del área de influencia de la zona de estudio de ese mismo año, y mediante el uso de AutoCAD V.2017 se determinó el porcentaje de cobertura Tabla 12 de cada uno de los 8 grupos de clasificación de los autores.

Tabla 12. Distribución de la cobertura vegetal en el Salto del Cabrón en 2009.

CLASIFICACIÓN	TOTAL (Ha)	PORCENTAJE DE COBERTURA (%)
Bosque cerrado	1,8	14,5
Matorral cerrado	0,5	3,9
Matorral enano	0,9	7,6
Gramíneas	0,1	0,8
Hierbas semileñosas	0,1	1,2
Gramíneas recientes establecidas en brinsal	0,2	2
Obras en concreto	0,4	3,6
Zona urbana	8	66,4
TOTALES	12,1	100

Fuente: tomado de (Universidad de Cartagena, 2009) y modificado por los autores.



De las 12,1 Ha estudiadas para el Salto del Cabrón y su área de influencia en 2009, aproximadamente 3,7 hectáreas corresponden a cobertura vegetal y las otras 8,4 restantes a la zona urbana y obras de mitigación en concreto realizadas en años anteriores. La vegetación dominante es el bosque cerrado (1D) que ocupa el 48,2% del área estudiada. En cuanto a las 3,7 hectáreas de vegetación específicamente, el bosque cerrado (1D) representa el 48,2%, los matorrales (1e y 1F) un 11,5%, las gramíneas (GR y GB) con un 2,8% y por último las hierbas semileñosas con un 1,2%.

Por otra parte, en el estudio más actual desarrollado por la Universidad de Cartagena en 2017, se identificaron tres tipos de cobertura vegetal en el área de influencia del proyecto: Arbustos y matorrales, Bosque Denso y Vegetación esclerófila y/o espinosa (ver Anexo 3). El Bosque Denso cubre el 36,1% del área total estudiada, seguido de Arbustos y matorrales (22,8%) y un menor porcentaje de Vegetación esclerófila y/o espinosa (4,7%) (Ver Tabla 13). En este estudio se destaca que el Bosque Denso abarca alrededor del 70% del área que comprende exclusivamente la vegetación, los autores también señalan que las formaciones vegetales, en su mayoría, no han sido intervenidas o su intervención ha sido selectiva sin alterar su estructura original ni las características funcionales.

Tabla 13. Distribución de la cobertura vegetal en el Salto del Cabrón en 2017.

CLASIFICACIÓN	TOTAL (Ha)	PORCENTAJE DE COBERTURA (%)
Afloramiento rocoso	0,47	3,8
Arbustos matorrales	2,81	22,8
Bosque denso	4,45	36,1
Tejido urbano continuo	3,85	31,3
Vegetación esclerófila y/o espinosa	0,58	4,7
Vías	0,17	1,3
TOTALES	12,1	100

Fuente: tomado de (Universidad de Cartagena, 2017) y modificado por los autores.

Se debe aclarar que las áreas de vegetación estudiadas por la Universidad de Cartagena en 2009 y 2017 fueron diferentes en cuanto al tamaño, puesto que en el año más reciente se abarcó un área de 8,31 Ha, mientras que en el 2009 se estudiaron sólo 3,7 Ha. En ambos estudios se observa que el bosque cerrado o denso ocupa el mayor porcentaje o abundancia en la vegetación y se ubica hacia las partes altas del talud (estrato de calizas), sin embargo



en el corazón del talud, que se constituye de una gran cárcava (delimitada con línea roja), la vegetación está compuesta mayormente por arbustos y matorrales, y vegetación esclerófila o espinosa como se ve en la Figura 35.



Figura 35. Vegetación en el área de la cárcava del Salto de Cabrón.
Fuente: (Universidad de Cartagena, 2017) y modificado por los autores.

5.1.3.1 El deterioro de la vegetación en el Salto del Cabrón

La flora del Cerro de La Popa en general ha sufrido un acelerado deterioro por múltiples factores que confluyen en el área como la tala para el establecimiento de poblaciones humanas y extracción de madera, incendios, creación de vías e infraestructura pública, entre otros, lo que ha contribuido a la disminución en la cobertura vegetal original (PNUMA 2009).

La zona del Salto del Cabrón, la vegetación también ha sido afectada por el deterioro, especialmente en las faldas del talud. En la Figura 36 se evidencia cómo en el año 2005 la cobertura vegetal parece estar en buen estado, a excepción de las zonas deforestadas dentro de las cárcava principal que se encuentran así quizá desde la formación de la misma, sin embargo, hacia el año 2009 (ver Figura 37), se comienza a entresacarse un claro en la parte alta del sector Las Flores en el barrio El Toril (círculo amarillo).

En el año 2015 (ver Figura 38) se observa que la zona desprovista de vegetación señalada con el círculo amarillo aumenta de tamaño considerablemente, además, un poco más al occidente, en el sector Loma del San Blas en el barrio El Toril, se aprecia de manera similar



una pérdida de vegetación (círculo azul). Más recientemente, en el año 2016 (ver Figura 39), es evidente que las zonas señaladas con círculos amarillo y azul aumentan, lo que sugiere que el proceso de deforestación y erosión en el talud se mantiene y avanza relativamente rápido.

Al sacar el área aproximada de estas áreas afectadas por medio de Google Earth Pro (ver Figura 40 y Figura 41), se estima que entre el año 2005 y 2018, se han perdido cerca de 0,13 Ha de vegetación en el Salto del Cabrón. En estas zonas se encuentran ubicadas cerca de las cárcavas de las faldas del talud y en ellas se evidencian materiales más oscuros, producto posiblemente de antiguos deslizamientos. Actualmente son utilizadas como botaderos clandestinos (ver Figura 42).



Figura 36. Vegetación del Salto del Cabrón en el año 2005.
Fuente: Google Earth Pro.

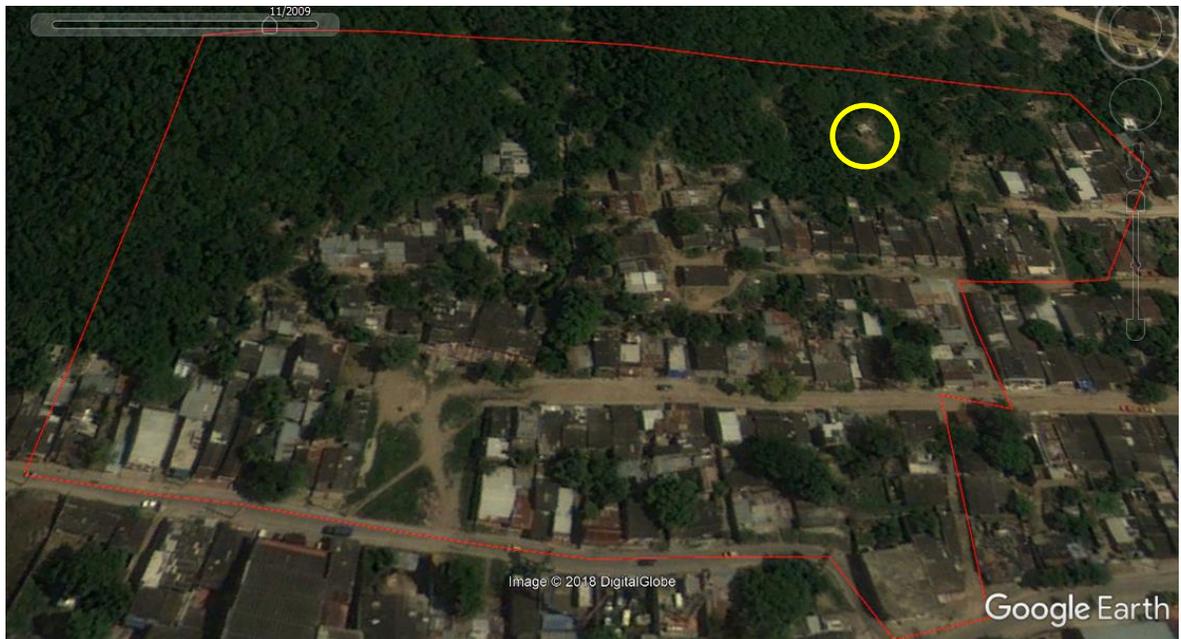


Figura 37. Vegetación del Salto del Cabrón en el año 2009.
Fuente: Google Earth Pro.



Figura 38. Vegetación del Salto del Cabrón en el año 2015.
Fuente: Google Earth Pro.



Figura 39. Vegetación del Salto del Cabrón en el año 2016.
Fuente: Google Earth Pro.



Figura 40. Vegetación del Salto del Cabrón en el año 2017.
Fuente: Google Earth Pro.

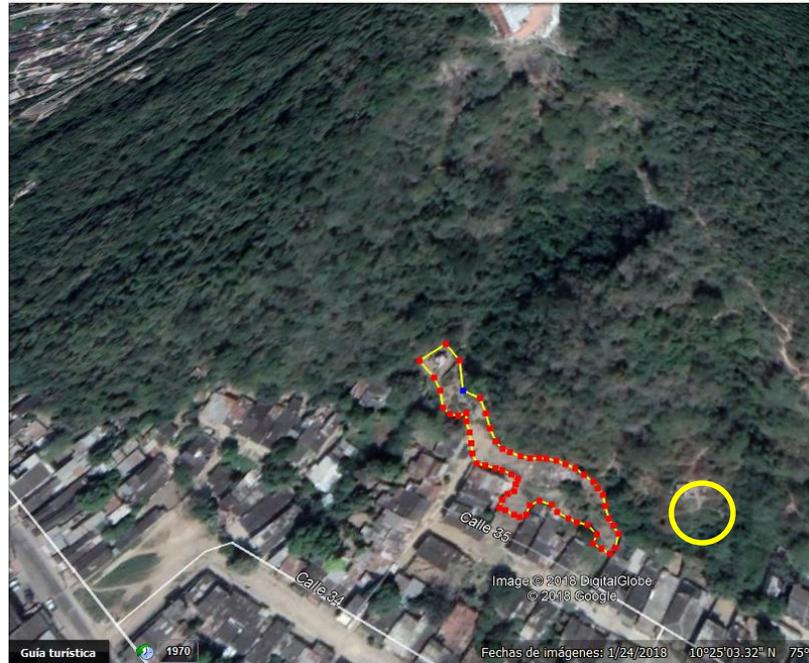


Figura 41. Vegetación del Salto del Cabrón en el año 2018.
Fuente: Google Earth Pro.



Figura 42. Áreas de pérdida de vegetación y cárcavas secundarias (paleocantilados).
Fuente: (Universidad de Cartagena, 2017) y modificado por los autores.



5.2 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN SECUNDARIA REFERENTE A ACTIVIDAD ANTRÓPICA EN EL SALTO DEL CABRÓN Y EVENTOS DE LLUVIA.

5.2.1 Evolución de la actividad antrópica en el Salto del Cabrón

A pesar de la escasa información bibliográfica de la evolución demográfica del Pie del Cerro de La Popa, se sabe que hacia los años 60 del siglo XX, las laderas y contornos del Cerro estaban poblados por algunas fincas de trabajo que eran utilizadas como fuente de maderas y como área de cultivo, por lo cual se empleó la técnica de desmonte y quema, para sembrar a chuzo, cultivos de maíz o estacas de yuca (Bocasnegras, Paternina, & Vergara, 2001).

Por aquella época existía también la explotación de canteras para la explotación de las calizas y las areniscas friables de la parte media de la ladera, aunque estas canteras fueron abandonadas al finalizar los años 60, hoy se observa como resultado escarpes verticales de 15 - 25 m de altura que tienen guardan gran relación en los procesos de inestabilidad del talud (Murcia Cañón & Carvajal Perico, 2017).

Posteriormente, a finales de los años 60, la necesidad de vivienda, hace que el cerro sea invadido por familias que se refugian en sus faldas, haciendo cortes y aplanando el terreno, con el fin de construir ya sea casitas de material o tugurios de madera, latas y plástico; y es entonces cuando esta zona comienza a ser el lugar de instalación de barrios populares e informales (Bocasnegras, Paternina, & Vergara, 2001). De la gran zona que constituía el Pie de La Popa, poco a poco se fueron segregando algunos sectores que formaron luego nuevos barrios por estar ya suficientemente poblados: El Toril, La Quinta y María Auxiliadora. (GEU, 2010).

Hace 43 años, se prohibió la tala y quema de árboles a través del Decreto 178 de 1973, por medio del cual se declaró al Cerro de La Popa como utilidad pública, así mismo el Decreto 116 de 1978 establece las políticas para recuperar, conservar y preservar las aéreas ecológicas localizadas en el perímetro urbano de la ciudad, entre las cuales contempla al Cerro de La Popa como una de ellas (EL UNIVERSAL 2014). En el año 1994 se fijó la cota 25 como límite de la zona de preservación ambiental.



En el 2009, la Universidad de Cartagena se realizó un censo en la zona de estudio y se determinó, entre otras cosas, que de las 178 viviendas encuestadas (23 en La Quinta y 155 en El Toril), el 80% de los propietarios de cada casa asegura tener 15 o más años viviendo en el sector, el 8% entre 10 y 15 años, el 6% entre 6 y 10 años y el 6% restante entre 2 y 5 años de permanencia. Por otra parte del total de personas encuestadas, un 84% reconoce que se encuentra viviendo en una zona de alto riesgo ante deslizamientos, mientras que el 73% de los encuestados estaría dispuesto a ser reubicado junto con su familia a una zona más segura.

De acuerdo a imágenes satelitales obtenidas de Google Earth, en el año 2005 (ver Figura 43) se observa en un círculo rojo las viviendas que se han referenciadas con los números 32 y 33, hasta ese entonces parecía ser la zona del talud más alta en ser habitada (cota 32 aproximadamente). Actualmente, las zonas desprovistas de vegetación mencionadas en la sección anterior, existen dos viviendas, con un tiempo de existencia no mayor a 9 años, enumeradas como 136 y 138 por la Universidad de Cartagena en 2017 (ver Figura 44), levantadas en materiales como madera y plástico, lo que pone de manifiesto que al día de hoy el Salto del Cabrón ha sido invadido aproximadamente hasta la cota 37.

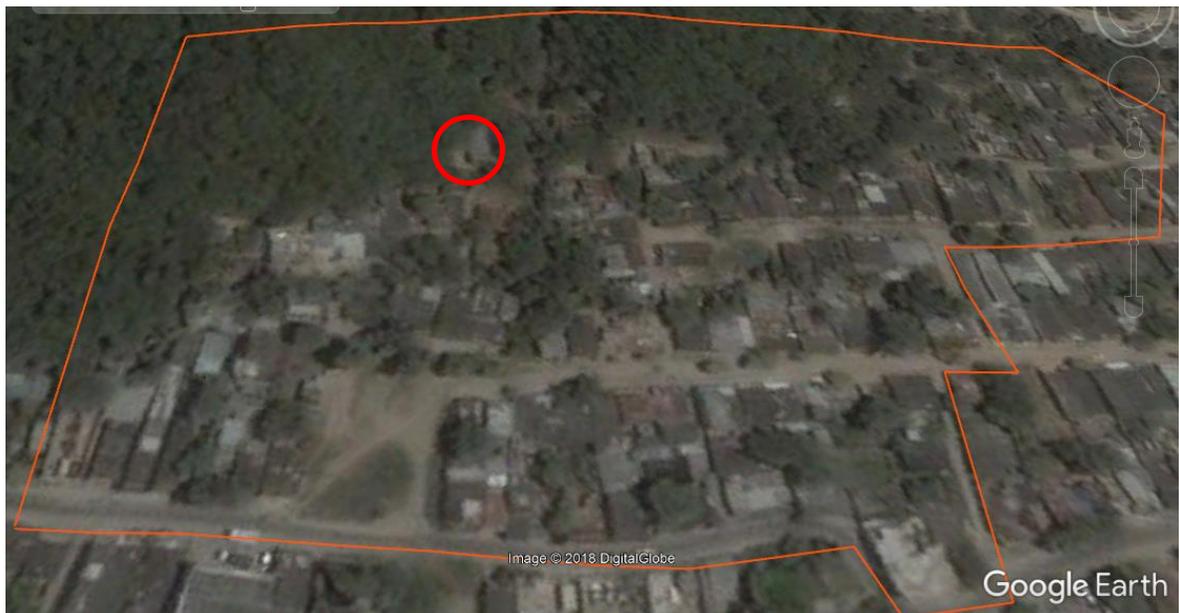


Figura 43. Viviendas hasta la cota 32 en el año 2005.
Fuente: modificado de Google Earth Pro.



Figura 44. Viviendas actuales en el área de influencia del Salto del Cabrón.
Fuente: (Universidad de Cartagena, 2017).

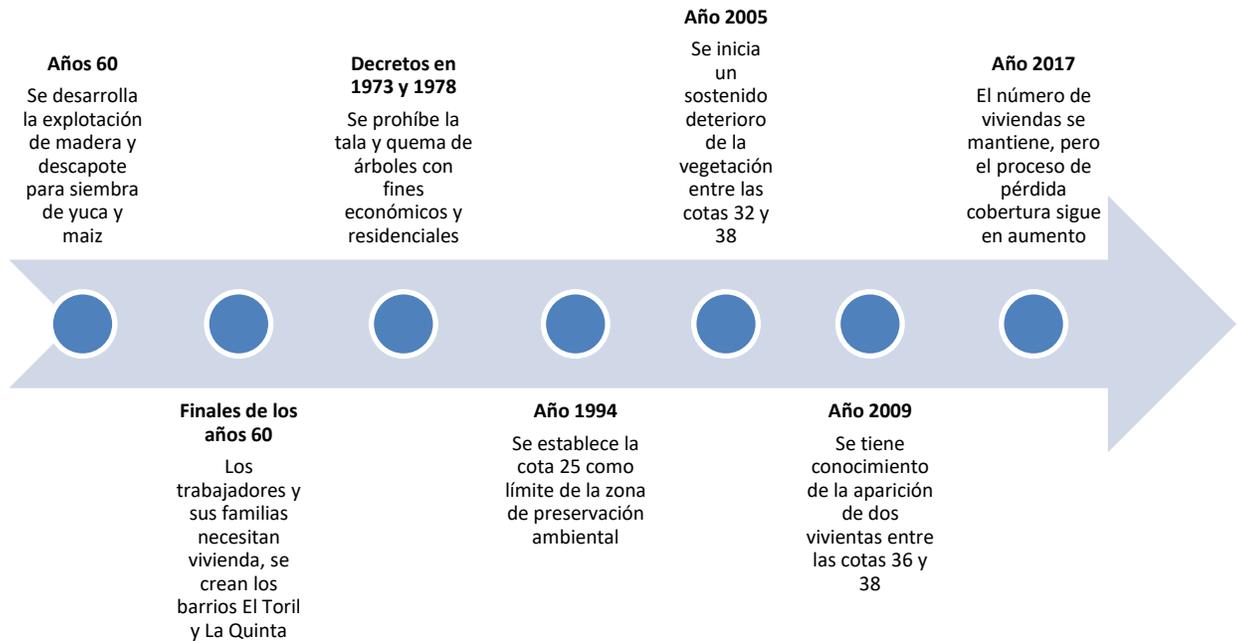
Las viviendas del barrio El Toril se ubican principalmente en las faldas de la Popa y su poblamiento data de más de 50 años, según sus habitantes, este barrio fue ocupado por una misma familia que se ha mantenido a lo largo del tiempo, estas personas aseguran que esa es una de las razones por las que la invasión al cerro no ha sido tan agresiva, que la tenencia a la propiedad de la mayoría de las viviendas es legal y que poseen títulos (Universidad de Cartagena, 2017).



Figura 45. Viviendas 136 y 138, ubicadas en el sector La Flores del Barrio La Quinta (cota 37) y el sector Lomas del San Blas del barrio El Toril (cota 35), respectivamente.
Fuente: (Universidad de Cartagena, 2017).



En la Gráfica 1, se muestra mediante una de línea de tiempo, una vision aproximada de la intervención humana en el area del influencia del Salto del Cabrón entre la década de los 60, hasta el año 2017.



Gráfica 1. Evolución de la actividad antrópica (asentamientos) entre 1960 y 2017.
Fuente: autores.

5.2.2 La precipitación en Cartagena

El Cerro de La Popa se encuentra ubicado en un área de características climáticas de bosque muy seco tropical con una temperatura media de 28 ° C y una precipitación promedio de 740 mm anuales, la cual se distribuye entre los meses de mayo, junio, agosto, septiembre y octubre, incluso hasta noviembre (Holdridge, 1997). El resto del año es seco con brisas marinas que deshidratan el ecosistema del Cerro, llevando la humedad relativa a niveles cercanos al 75% o menos en los periodos críticos.

La precipitación pluvial es del tipo torrencial, sin embargo en años secos, pueden ocurrir fenómenos como el que la lluvia se concentre en solo 2 o 3 meses, y aún en los meses lluviosos puede haber periodos largos (de 20 o más días) entre un aguacero y otro (Bocasnegras, Paternina, & Vergara, 2001).



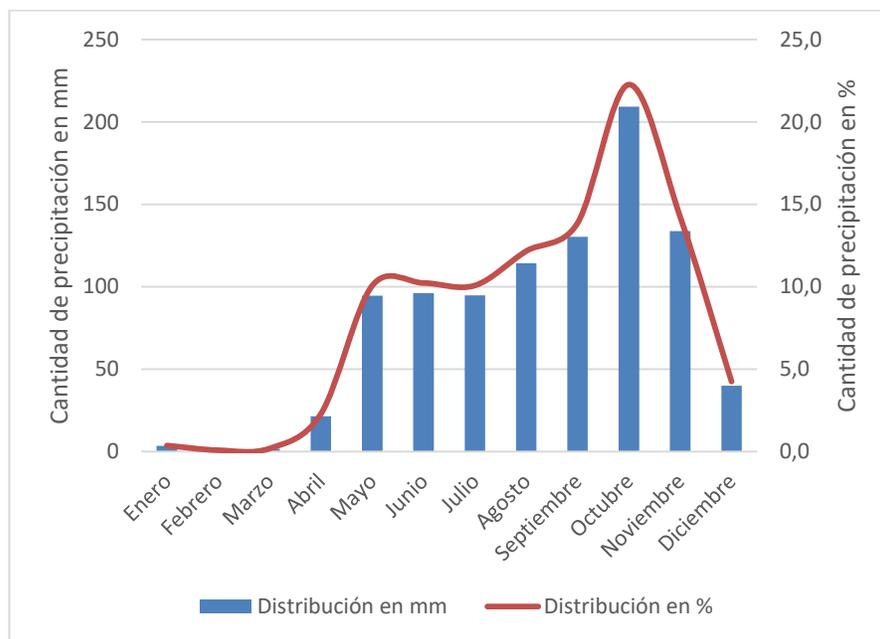
Con el propósito de obtener información estadística suficiente que ilustre el comportamiento de la lluvia en Cartagena, se utilizaron los registros pluviométricos de la estación meteorológica más cercana al área de estudio, en este caso los del Aeropuerto Internacional Rafael Núñez suministrados por el IDEAM.

Los datos del número de días lluvioso promedio al mes, la precipitación media mensual y el porcentaje de distribución de las lluvias entre los años 1941 y 2017 según el IDEAM son mostrados en la Tabla 14.

Tabla 14. Número de días lluvioso promedio al mes y distribución de la precipitación mensual en Cartagena entre 1941 y 2017.

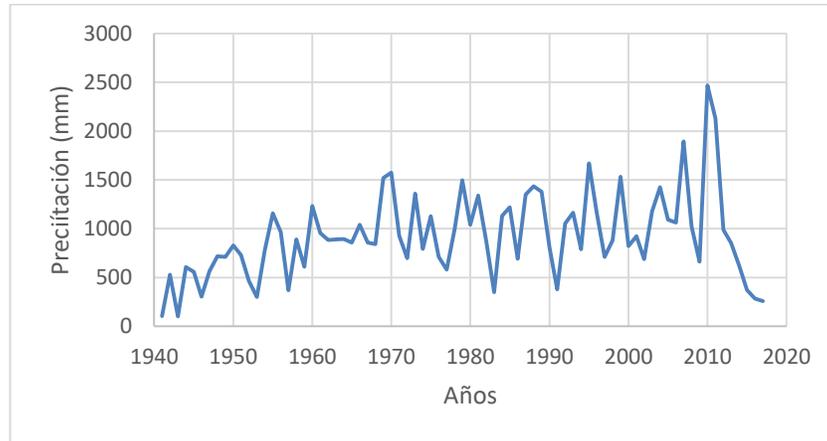
MES	# DE DÍAS DE LLUVIA/MES	PRECIPITACIÓN (mm/mes)	PRECIPITACIÓN (%)
Enero	0	3,4	0,4
Febrero	0	0,7	0,1
Marzo	1	1,7	0,2
Abril	3	21,4	2,3
Mayo	10	94,6	10,1
Junio	12	96,1	10,2
Julio	10	94,7	10,1
Agosto	13	114,3	12,2
Septiembre	14	130,3	13,9
Octubre	16	209,3	22,3
Noviembre	11	133,8	14,2
Diciembre	3	39,9	4,2
TOTALES	93	940,2	100

Fuente: Estación meteorológica Aeropuerto Internacional Rafael Núñez (IDEAM).

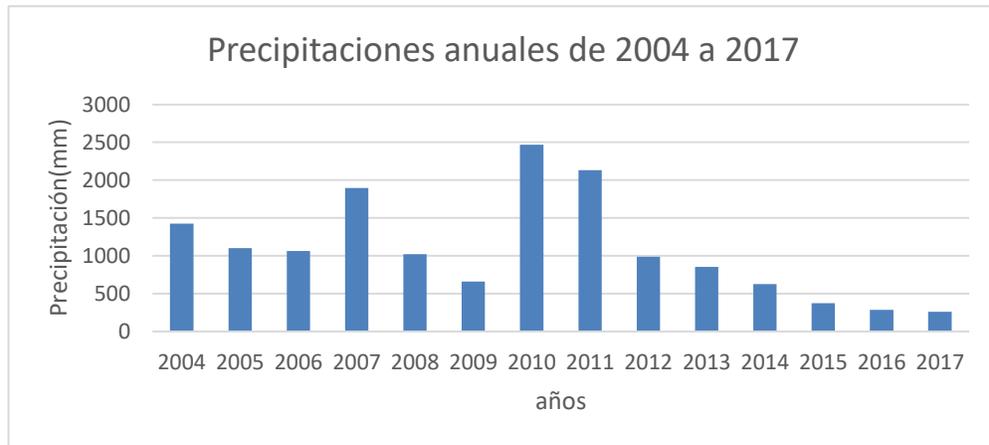


Gráfica 2. Distribución de la precipitación mensual en Cartagena de 1941 a 2017.
Fuente: Estación meteorológica Aeropuerto Internacional Rafael Núñez (IDEAM) y modificado por los autores.

Entre diciembre y abril se presenta el 7,1% de la precipitación anual, en el periodo de mayo a agosto el 42,5% y de septiembre a noviembre el 50,4% restante. El mes más lluvioso es octubre con un porcentaje de precipitación del 22,3% y un promedio de 209,3 mm de lluvia en los 76 años, así mismo, octubre es el mes con más número de días lluviosos con 16 días en promedio. Según la estadística de la Tabla 14 en Cartagena llueve alrededor de 93 días en el año, es decir un 25,5% del año es lluvioso y el 74,5% restante es seco. En la Gráfica 3 y la Gráfica 4 se presenta la cantidad de precipitación por año en mm ocurrida entre 1941 y 2017 y la cantidad de precipitación anual en el periodo de tiempo de este estudio (2004 y 2017) respectivamente.



Gráfica 3. Precipitación anual desde 1941 hasta 2017 en mm. Fuente: Estación meteorológica Aeropuerto Internacional Rafael Núñez (IDEAM) y modificado por los autores.



Gráfica 4. Precipitación anual desde 2004 hasta 2017 en mm. Fuente: Estación meteorológica Aeropuerto Internacional Rafael Núñez (IDEAM) y modificado por los autores.

Se observa que el año 2010 fue el más lluvioso (2469,2 mm/año), no sólo dentro del periodo de tiempo estipulado para esta investigación, si no dentro de todos los años de los que se tiene registro en la estación meteorológica Rafael Núñez (1941 – 2017), lo que quiere decir que en el 2010 se presentó la ola invernal más cruda de la que se tiene registro en Colombia.



5.3 MODELACIÓN DE LOS PERFILES TÍPICOS CON EL SOFTWARE SLIDE V.6.0

5.3.1 Parámetros de entrada

5.3.1.1 Modelo conceptual

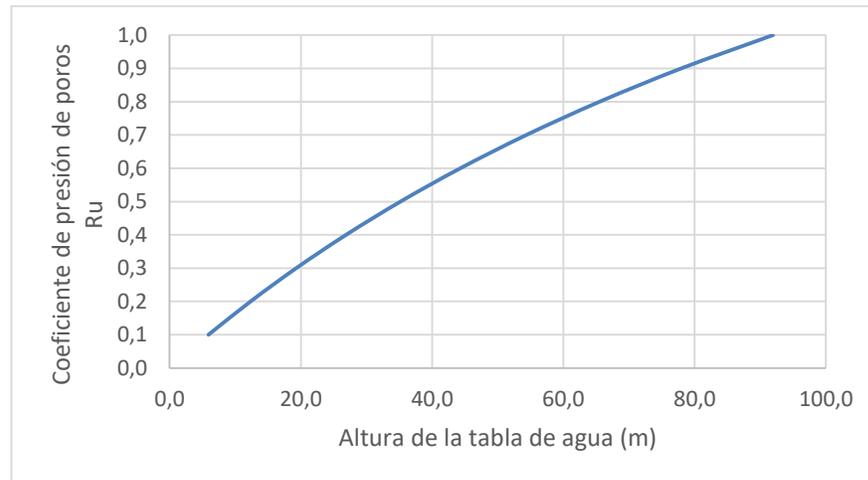
A partir de la caracterización geológica e hidrogeológica realizada para la zona de estudio con bases en los estudios desarrollados por la Universidad de Cartagena, se definieron las condiciones internas y de frontera para los taludes típicos como se indica a continuación:

- La infiltración se dará en el borde superior del estrato de calizas (zona potencial de recarga).
- Los contornos derecho, izquierdo e inferior con condiciones de flujo desconocidas ($P = 0$ o $Q = 0$).
- Se permite la interacción hidrodinámica entre todos los estratos (límites internos permeables).
- En el estrato de caliza se asume un nivel freático teórico que conformaría un acuífero libre.
- Se asume un coeficiente de presión de poros $R_u = 0,3$ en la zona potencial de recarga para simular la condición de saturación parcial por el acuífero.
- Se asume el suelo como un medio continuo poroso, isotrópico ($K_1/K_2 = 1$) y heterogéneo.

En la Figura 46 ilustran los aspectos más importantes del modelo conceptual. Mediante las ecuaciones de esfuerzo total vertical, efectivo y de presión de poros (Ecuaciones 2, 3 y 4) y asumiendo un coeficiente de presión de poros $R_u = 0,3$ (Ecuación 5), se determinó una altura de nivel freático en el estrato de calizas de 19 m en el punto más alto, lo cual simularía un posible acuífero libre dado en esta zona por la permeabilidad secundaria. En la Gráfica 5 se muestra la variación de la altura máxima de una tabla de agua en el estrato de calizas para valores de R_u entre 0 y 1, se aprecia que para valores superiores a 0,4 el nivel de agua superaría la altura total del estrato.



Para los estratos de limos arenosos calcáreos, arcillolitas con niveles limosos y depósitos de deslizamientos se determinó con base en la Figura 4 de la sección *MARCO TEÓRICO*, un $R_u = 0,2$, asumiendo que éstos pueden tener una saturación máxima del 50% dada sus características de acuitardos y acuícludos.



Gráfica 5. Variación del nivel freático según distintos valores de R_u en la zona de recarga.
Fuente: autores.

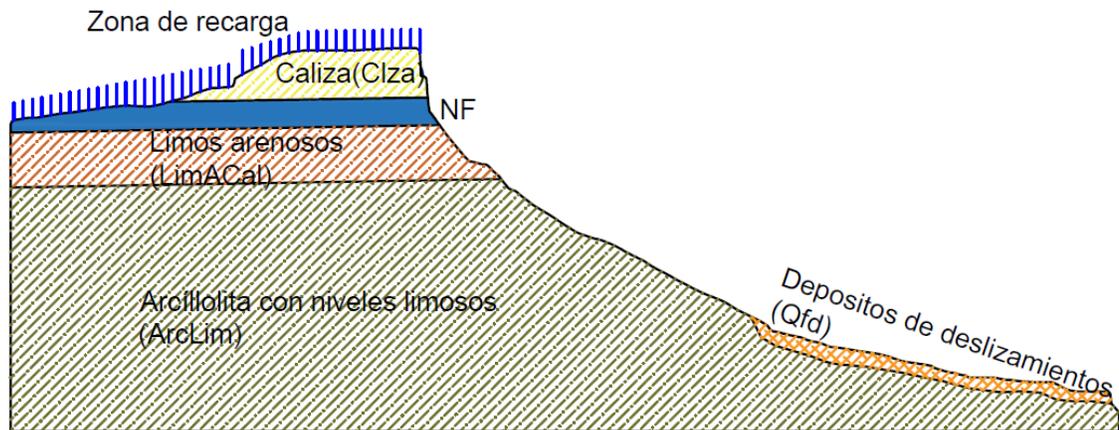


Figura 46. Modelo conceptual de diseño.
Fuente: tomado de (Universidad de Cartagena, 2017) y modificado por los autores.

5.3.1.2 Parámetros geotécnicos de entrada

De acuerdo con el ensayo de compresión simple realizado en el estrato de calizas por la Universidad de Cartagena en 2017, cuyos valores se encuentran entre 11 Mpa y 20 Mpa, se determinó que ésta se comporta como una roca sedimentaria blanda (ver Tabla 4), por lo



tanto y de acuerdo con la Tabla 2 y la Tabla 3 de la sección 1.2.5.3, se definió una cohesión de 1 Mpa (1000 kN/m²) y un ángulo de fricción interna de 35° para este estrato.

Los demás parámetros geotécnicos de entrada para el software Slide, a excepción del coeficiente de presión de poros Ru (ver sección anterior), se estimaron de acuerdo al resumen de características geotécnicas de los perfiles, realizado con base en los estudios de campo y ensayos de laboratorio llevados a cabo por la Universidad de Cartagena en 2009 y 2017 (ver anexos 16, 17, 18, 19, 20, 21 y 22).

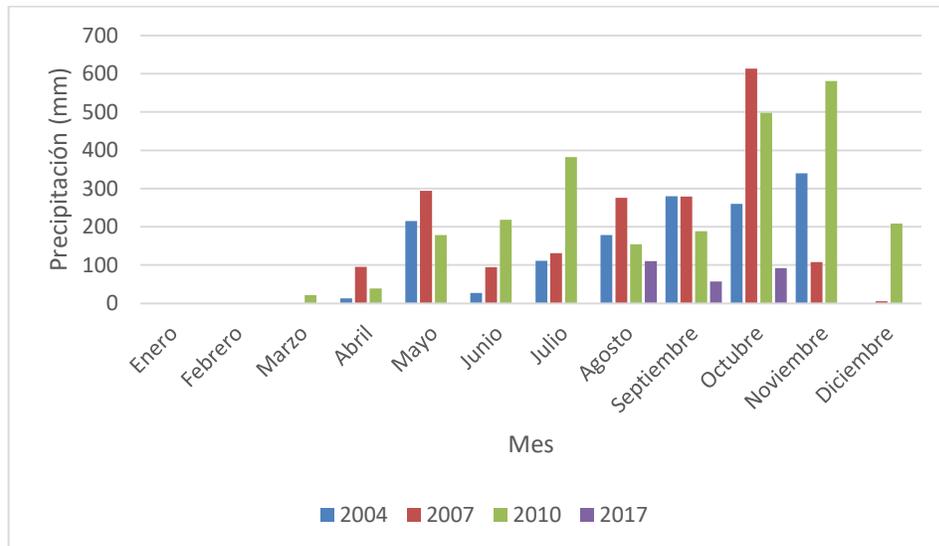
Tabla 15. Parámetros geotécnicos de entrada para el software Slide V.6.0.

MATERIAL	PESO ESPECÍFICO HÚMEDO (kN/m³)	COHESIÓN (kN/m²)	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA (°)	HUMEDAD NATURAL (%)	COEFICIENTE DE PRESIÓN DE POROS (RU)
Caliza	19	1000	35	10	0,3
Limos arenosos calcáreos	19	70	23	17	0,2
Arcillolitas con niveles limosos	18	90	22	15	0,2
Depósitos de deslizamientos	20	55	20	14	0,2

Fuente: modificados por los autores.

5.3.1.3 Lluvia de diseño

Se analizó el efecto de la lluvia en aquellos años en los que de acuerdo con Murcia Cañón & Carvajal Perico (2017), se tiene conocimiento de eventos de deslizamientos y amenaza de caída de bloques en las laderas de la zona sur de La Popa, es decir 2004, 2007 y 2017, adicionalmente se realizaron modelaciones con las lluvias del año 2010, puesto que en éste, aunque no se tiene reportes verificados de deslizamientos en la zona sur del Cerro o en el Salto del Cabrón, fue un año cuya temporada de lluvias ha sido la más extrema del país desde que se tiene registro (alrededor de 80 años). En cada año, se evaluaron los meses de mayo a noviembre, por ser estos donde se desarrolla el comportamiento típico de la precipitación en Cartagena. El año 2017 sólo se registraron lluvias en los meses de agosto, septiembre y octubre siendo el año menos lluvioso desde el 2004 (ver Gráfica 6).



Gráfica 6. Precipitación mensual en los años 2004, 2007, 2010 y 2017.

Fuente: Estación meteorológica Aeropuerto Internacional Rafael Núñez (IDEAM) y modificado por los autores.

5.3.1.4 Cálculo de la infiltración en la zona de recarga

El ensayo de permeabilidad (K) realizado en la zona de recarga (caliza), arrojó como resultado una permeabilidad promedio de 0,00016 m/seg (0,016 cm/seg), valor que excede los límites establecidos en la literatura para permeabilidades “muy altas” (ver Tabla 7, sección 1.2.7); lo anterior se dio posiblemente a que no se contaba con equipos necesarios para seguir la metodología adecuada de ensayos de permeabilidad in situ en roca, sin alterar sus propiedades físicas y mecánicas. Por lo tanto se asume un valor de permeabilidad de 1×10^{-3} cm/seg que representa una permeabilidad de “moderada a alta”.

Se calculó para cada año escogido en el apartado de *Lluvia de diseño*, la infiltración de acuerdo con el modelo de Schosinsky (ecuación 8). Se asumió un porcentaje de retención $C_{fo} = 12\%$, ya que (Butler, 1957) sugiere éste valor a menos que se trate de suelos provistos con bosques muy densos, cuyo porcentaje aumenta hasta el 20%, pero ese no es el caso del Salto del Cabrón, donde la cobertura de bosque no es de gran densidad y la altura máxima de los árboles apenas sobrepasa los 10 metros de altura en algunas especies.

Los parámetros de retención por pendiente y follaje (K_p y K_v) se determinaron de acuerdo con la Tabla 9 (sección 1.2.8) para un promedio de pendientes del terreno entre 0% y 5% y una vegetación predominante de bosque en la zona potencial de recarga. El parámetro de



infiltración por tipo de suelo (K_{fc}) se asumió igual a 1, debido a que el valor de permeabilidad establecido para la caliza sobrepasa los límites admisibles en el modelo propuesto por Schosinsky (16 a 1568 mm/día).

Tabla 16. Parámetros utilizados para calcular la infiltración mensual.

Cfo	Kfc	Kp	Kv	Ci
0,12	1	0,15	0,2	1,35

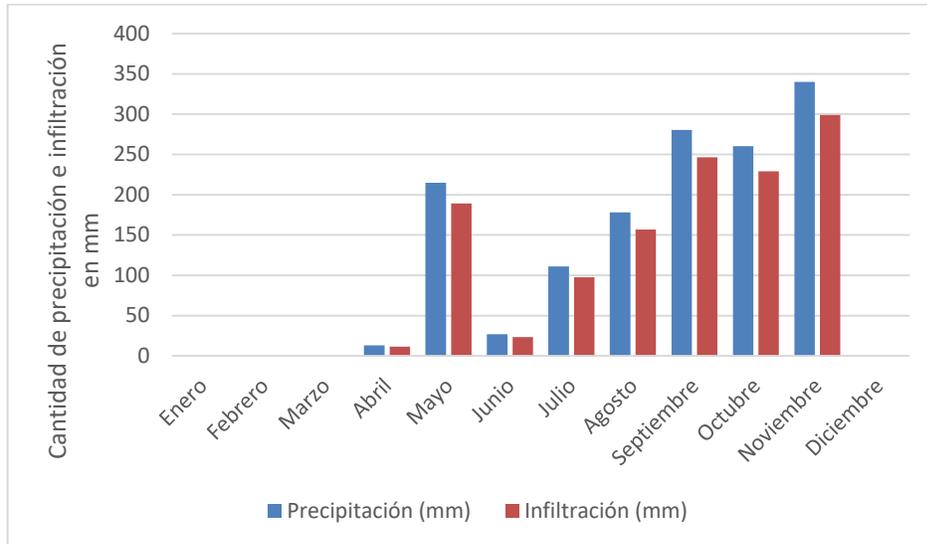
Fuente: (Schosinsky N., 2007).

En la tabla anterior se presentan los valores de, Cfo, Kp, Kv, Ci y el porcentaje de cobertura en la caliza, cabe anotar que aunque para Ci se obtuvo un valor 1,3, éste se asumo igual a 1, puesto que el modelo establece un límite menor o igual a la unidad. En la Tabla 17 y las gráficas 7, 8, 9 y 10 se observan los resultados de retención por follaje e infiltración en el suelo de acuerdo al método de Schosinsky para los años 2004, 2007, 2010 y 2017.

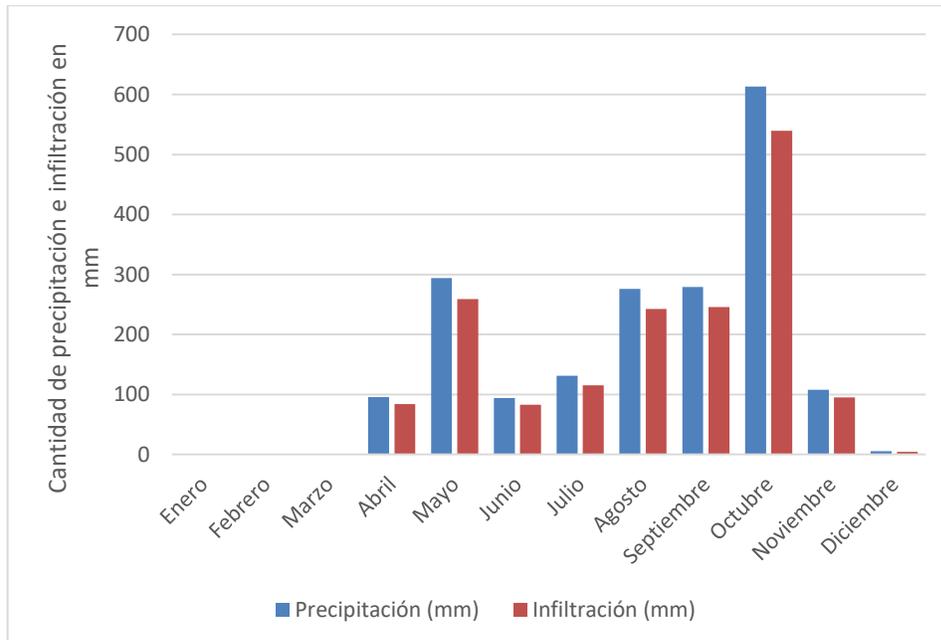
Tabla 17. Retención e infiltración por método de Schosinsky.

MES	AÑO 2004			AÑO 2007			AÑO 2010			AÑO 2017		
	Precipitación (mm)	Retención follaje (mm)	Infiltración (mm)	Precipitación (mm)	Retención follaje (mm)	Infiltración (mm)	Precipitación (mm)	Retención follaje (mm)	Infiltración (mm)	Precipitación (mm)	Retención follaje (mm)	Infiltración (mm)
ENE.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FEB.	0	0	0	0,1	0,012	0,088	0,03	0,0036	0,0264	0	0	0
MAR.	0	0	0	0	0	0	21,4	2,568	18,832	0	0	0
ABR.	13	1,56	11,44	95,4	11,448	83,952	38,7	4,644	34,056	0	0	0
MAY.	215	25,788	189,112	294,2	35,304	258,896	178,5	21,42	157,08	0	0	0
JUN.	26,8	3,216	23,584	94,2	11,304	82,896	218,4	26,208	192,192	0	0	0
JUL.	111	13,308	97,592	131,1	15,732	115,368	382,5	45,9	336,6	0	0	0
AGO.	178	21,372	156,728	275,7	33,084	242,616	154,4	18,528	135,872	110,6	13,272	97,328
Sep.	280	33,624	246,576	279,1	33,492	245,608	188,3	22,596	165,704	57,2	6,864	50,336
Oct.	260	31,224	228,976	613	73,56	539,44	497,9	59,748	438,152	91,9	11,028	80,872
Nov.	340	40,776	299,024	107,9	12,948	94,952	580,9	69,708	511,192	0	0	0
Dic.	0	0	0	5,2	0,624	4,576	208,2	24,984	183,216	0	0	0

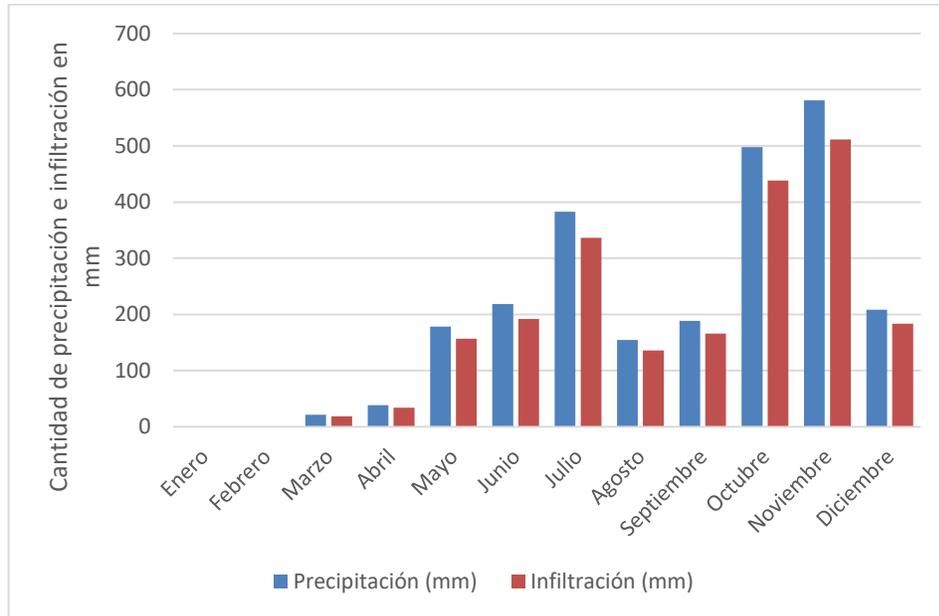
Fuente: autores.



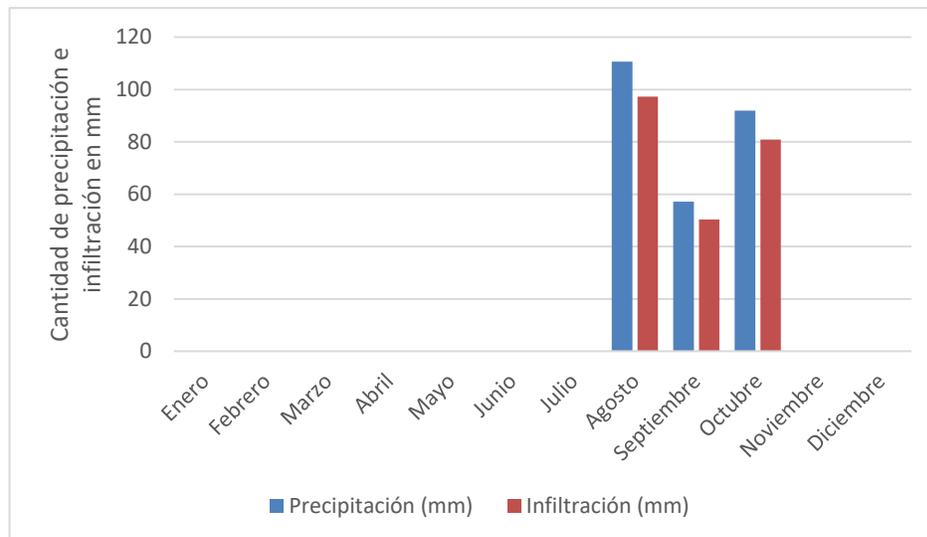
Gráfica 7. Precipitación e infiltración en el año 2004.



Gráfica 8. Precipitación e infiltración en el año 2007.



Gráfica 9. Precipitación e infiltración en el año 2010.



Gráfica 10. Precipitación e infiltración en el año 2017.

Debido a la alta permeabilidad evidenciada en la zona de recarga y sus pendientes relativamente planas, la infiltración con respecto a la lluvia con el modelo de Schosinsky presenta una reducción del 12%, lo que quiere decir que la ecuación para infiltración se redujo a la expresión $P_i = P - Ret$, puesto que el valor de C_i se aproximó a 1.



5.3.1.5 Propiedades hidráulicas de la zona potencial de recarga

El comportamiento del acuífero libre que se podría conformar en el estrato superior de calizas, está gobernado en la zona saturada (debajo del nivel freático) por la ley de Darcy, mientras que la zona parcialmente saturada (por arriba del nivel freático) es representada por la ecuación analítica propuesta por Van Genuchten (ecuación 33).

El contenido de agua saturada (S) fue derivado de la porosidad (n) determinada por los estudios de la Universidad de Cartagena y empleando la ecuación 29. En la Tabla 18 se presentan los parámetros seleccionados para poder definir la permeabilidad saturada Ks empleando el modelo mencionado.

Tabla 18. Parámetros para definir Ks en la zona de recarga.

ω (%)	Gs	n (%)	e (%)	S (%)	K (m/s)
10,0	2,63	28	39	67,6	1×10^{-5}

Fuente: Tomado de (Universidad de Cartagena, 2017) y modificado por los autores.

Finalmente, con los parámetros dependientes de la gradación y clasificación textural del suelo propuestos por Van Genuchten para suelos rocosos $\alpha = 0,79$; $n = 10,4$ y $m = 0,9$ (Van Genuchten, 1980), se obtuvo una permeabilidad saturada Ks en la caliza de $3,25 \times 10^{-5}$ m/s.

5.3.2 Resultado de la modelación en Slide V.6.0 (Factores de Seguridad)

A continuación se presentan los valores obtenidos de factor de seguridad de los dos perfiles de diseño por cada uno de los métodos de equilibrio límite (*Bishop*, *Janbú* y *Morgentern/Price*), y cada una de las combinaciones de escenarios de estabilidad posibles descritas en la sección 4.3. En la Tabla 19 se observa la clasificación de los factores de seguridad de acuerdo al grado de estabilidad del perfil. También se tuvo en cuenta el criterio propuesto por Escobar y Duque (2016) que indica que un factor de seguridad igual a 1,00, representa que el talud está en un estado de falla incipiente y generalmente un valor de 1,40 es aceptable para el diseño de un talud estable.



Tabla 19. Clasificación de los factores de seguridad.

Grado de estabilidad	Rango del Factor de Seguridad	Color
Estable	$FS > 1,5$	
En aparente estabilidad	$1,2 < FS < 1,5$	
Inestable	$FS < 1,2$	

Fuente: (Suárez Díaz J. , 1998).

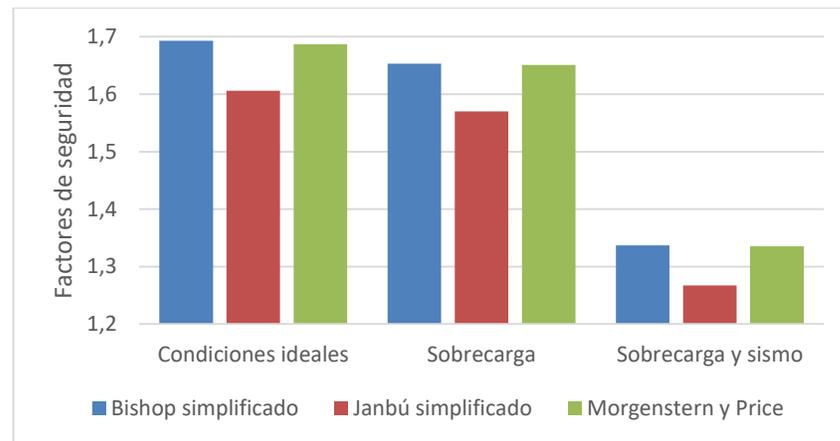
5.3.2.1 Factores de seguridad para los perfiles sin infiltración.

- Factores de seguridad del perfil 1

Tabla 20. Factores de seguridad para el perfil 1 sin incidencia de la infiltración.

PERFIL 1			
Condición del perfil	Modelo de equilibrio límite		
	Bishop simplificado	Janbú simplificado	Morgenstern Price
Condiciones ideales	1,693	1,606	1,687
Con sobrecarga del Convento	1,653	1,570	1,651
Con sobrecarga y sismo	1,337	1,267	1,335

Fuente: autores.



Gráfica 11. Factores de seguridad del perfil 1 sin incidencia de la infiltración.

Fuente: autores.

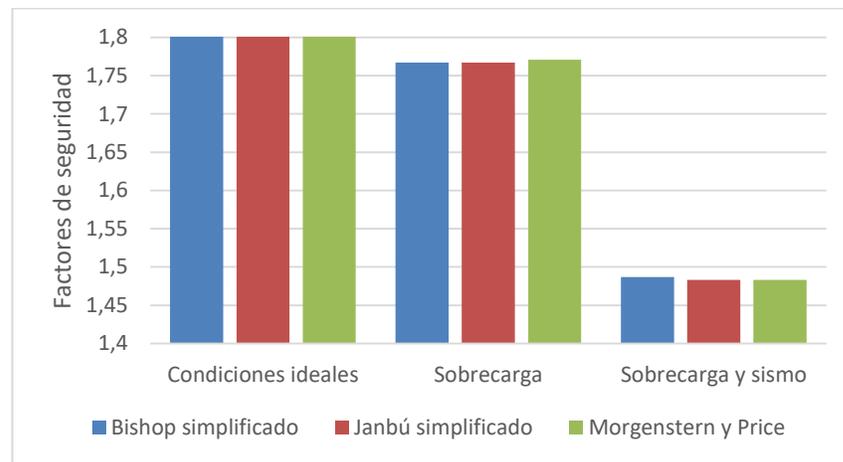


- Factores de seguridad del perfil 2

Tabla 21. Factores de seguridad para el perfil 2 sin incidencia de la infiltración.

PERFIL 2			
Condición del perfil	Modelo de equilibrio límite		
	Bishop simplificado	Janbú simplificado	Morgenstern Price
Condiciones ideales	1,811	1,811	1,814
Con sobrecarga del Convento	1,767	1,767	1,771
Con sobrecarga y sismo	1,487	1,483	1,483

Fuente: autores.



Gráfica 12. Factores de seguridad del perfil 2 sin incidencia de la infiltración.

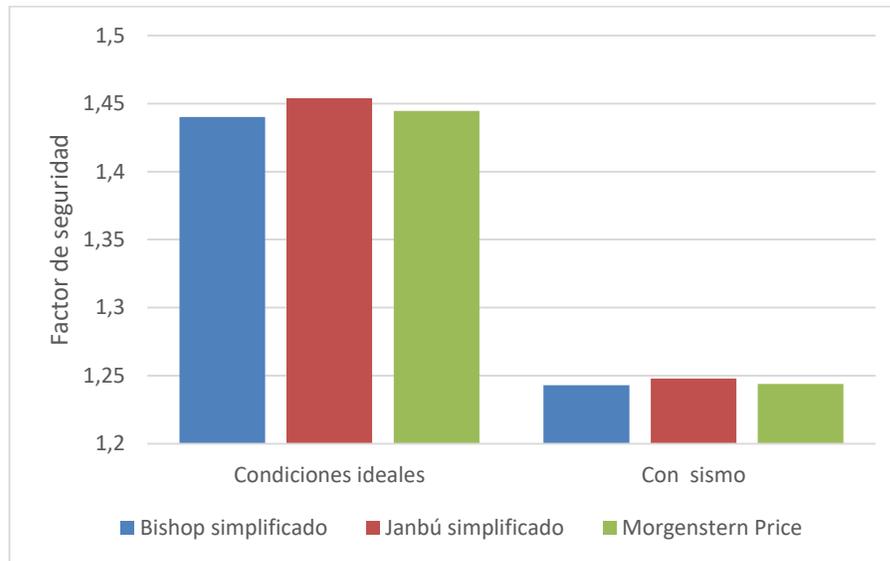
Fuente: autores.

- Factores de seguridad del perfil 3

Tabla 22. Factores de seguridad del perfil 3.

PERFIL 3			
Condición del perfil	Modelo de equilibrio límite		
	Bishop simplificado	Janbú simplificado	Morgenstern Price
Condiciones ideales	1,44	1,454	1,445
Con sobrecarga	--	--	--
Con sismo	1,243	1,248	1,244

Fuente: autores.



Gráfica 13. Factores de seguridad del perfil 3.

Fuente: autores.

Como se puede observar en la Tabla 20, la Tabla 21, la Gráfica 11 y la Gráfica 12, en general ambos perfiles se encuentran en una condición estable, aunque el perfil 1 se muestra como el más crítico con un factor de seguridad promedio en épocas secas (con sobrecarga) de 1,62; por su parte el perfil 2 en las mismas condiciones, alcanza valores de factor de seguridad en promedio de 1,77. La diferencia entre dos factores es del 8,5% lo que sugiere que el análisis de estabilidad es coherente.

También se puede observar que la sobrecarga en el estrato de calizas producida por el convento de los Agustinos Recoletos en el perfil 1 reduce el factor de seguridad de un promedio de 1,66 a 1,62, es decir una reducción del 2,4%; en el perfil 2 esta reducción se da un factor de seguridad de 1,81 a 1,77 (reducción del 2,2%). Esto sugiere que la estructura no afecta de manera significativa la estabilidad del talud.

En el caso eventual se un evento sísmico, en el perfil 1 la reducción del factor de seguridad sería de 1,62 a 1,31 (reducción del 20%), en el perfil 2, el cambio se da de un 1,77 a 1,48 (reducción del 15,8%), es decir la aceleración sísmica influye significativamente en la estabilidad de los perfiles.

En la tabla Tabla 22 y la Gráfica 13 se observa que el perfil 3 se encuentra en una condición aparentemente estable con un factor de seguridad promedio de 1,45. No se aplicó sobrecarga



en la cima del perfil debido a que éste no atraviesa por el estrato de calizas que soporta el convento de los Agustinos Recoletos.

- **Factores de seguridad en las faldas del talud**

En la Tabla 23 se observa el factor de seguridad obtenido en las faldas del talud, donde según la topografía del año 2017 se encuentran los asentamientos por viviendas (viviendas ubicadas entre cota 27 y la cota 10 aproximadamente). Los 3 perfiles de diseño se mantuvieron estables, sin embargo la aplicación de sobrecarga en el perfil 1 disminuyó el factor de seguridad un 12% aproximadamente, mientras que el perfil 3, la reducción fue de alrededor del 22%. En el perfil 2 no se aplicó sobrecargas debido a que en esa zona no hay asentamientos humanos.

Tabla 23. Factores de seguridad en las faldas del perfil.

CONDICIÓN DE ESTABILIDAD	PERFIL 1			PERFIL 2			PERFIL 3		
	Bishop simplificado	Jambú Simplificado	Morgesntern Price	Bishop simplificado	Jambú Simplificado	Morgesntern Price	Bishop simplificado	Jambú Simplificado	Morgesntern Price
Sin sobrecarga	7,287	7,191	7,286	2,689	2,64	2,685	8,238	8,261	8,24
Con sobrecarga por viviendas	6,407	6,316	6,407	--	--	--	6,413	6,421	6,414
Con sismo	4,143	4,096	4,143	2,168	2,092	2,167	5,067	5,07	5,064

Fuente: autores.



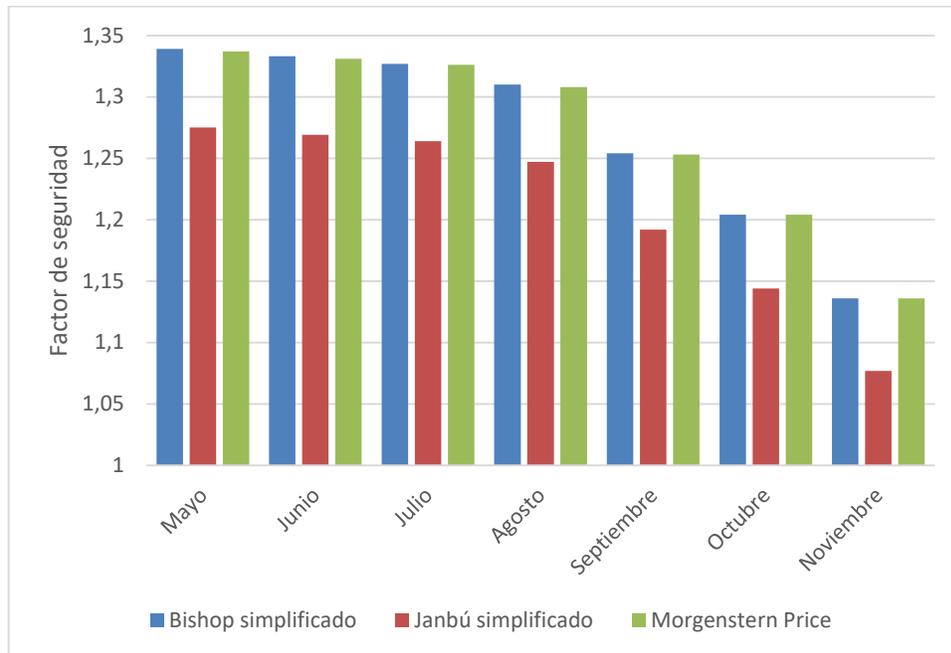
5.3.2.2 Factores de seguridad para los perfiles con infiltración

- Factores de seguridad del perfil 1

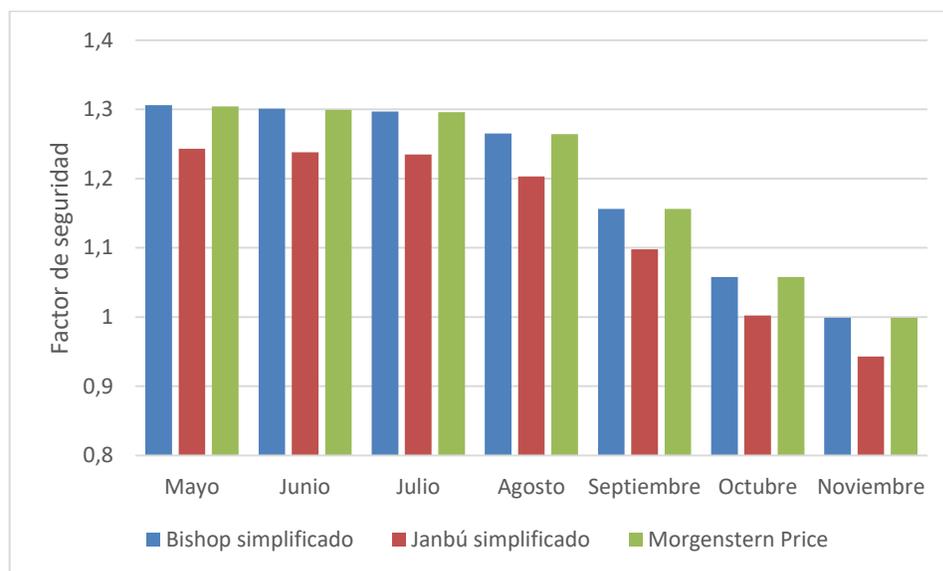
Tabla 24. Factores de seguridad del perfil 1 con incidencia de la infiltración.

Año	Mes	PERFIL 1 CON INFILTRACIÓN			PERFIL 1 CON INFILTRACIÓN Y SISMO		
		Modelo de equilibrio límite			Modelo de equilibrio límite		
		Bishop simplificado	Janbú simplificado	Morgenstern Price	Bishop simplificado	Janbú simplificado	Morgenstern Price
2004	Mayo	1,339	1,275	1,337	1,086	1,031	1,085
	Junio	1,333	1,269	1,331	1,08	1,025	1,079
	Julio	1,327	1,264	1,326	1,076	1,022	1,076
	Agosto	1,31	1,247	1,308	1,062	1,008	1,063
	Septiembre	1,254	1,192	1,253	1,017	0,965	1,019
	Octubre	1,204	1,144	1,204	0,979	0,926	0,98
	Noviembre	1,136	1,077	1,136	0,925	0,873	0,926
2007	Mayo	1,306	1,243	1,304	1,07	1,015	1,07
	Junio	1,301	1,238	1,299	1,065	1,01	1,065
	Julio	1,297	1,235	1,296	1,052	0,999	1,053
	Agosto	1,265	1,203	1,264	1,026	0,974	1,027
	Septiembre	1,156	1,098	1,156	0,94	0,889	0,942
	Octubre	1,058	1,002	1,058	0,836	0,813	0,865
	Noviembre	0,999	0,943	0,999	0,7902	0,7672	0,7902
2010	Mayo	1,341	1,278	1,34	1,089	1,034	1,088
	Junio	1,277	1,215	1,276	1,036	0,984	1,037
	Julio	1,235	1,175	1,235	1,002	0,951	1,004
	Agosto	1,223	1,163	1,223	0,99	0,939	0,992
	Septiembre	1,095	1,038	1,095	0,892	0,842	0,894
	Octubre	0,97	0,915	0,97	0,794	0,744	0,798
	Noviembre	0,793	0,743	0,796	0,654	0,608	0,657
2017	Agosto	1,453	1,390	1,451	1,190	1,135	1,191
	Septiembre	1,444	1,382	1,443	1,183	1,129	1,184
	Octubre	1,412	1,350	1,411	1,157	1,102	1,158

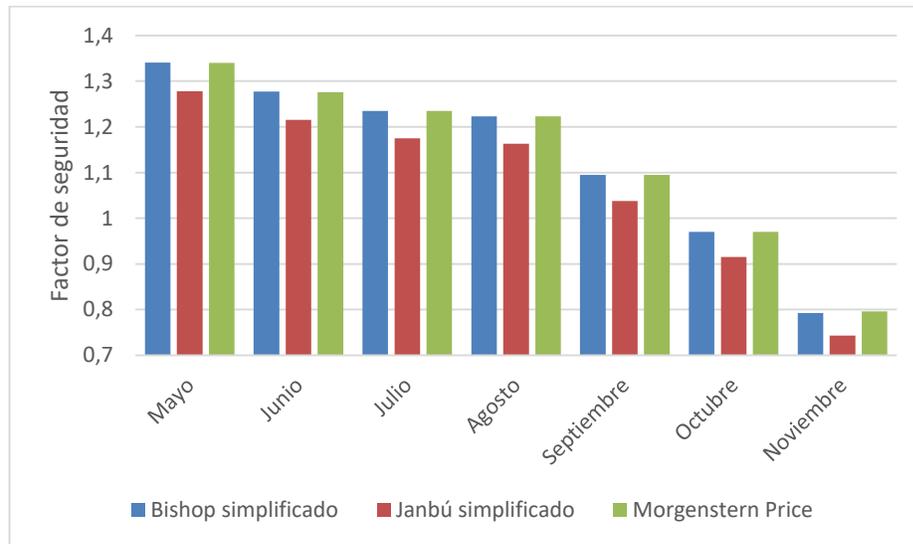
Fuente: autores.



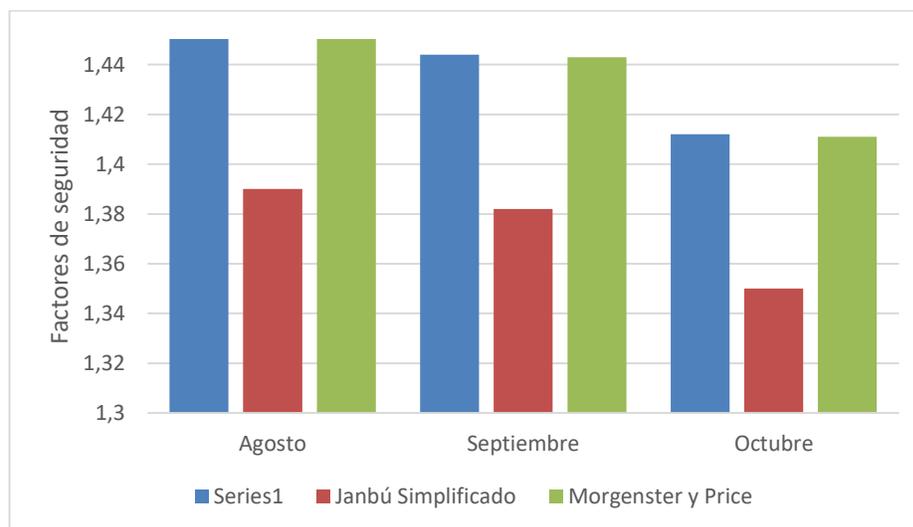
Gráfica 14. Factores de seguridad para el perfil 1 con infiltración del año 2004.



Gráfica 15. Factores de seguridad para el perfil 1 con infiltración del año 2007.



Gráfica 16. Factores de seguridad para el perfil 1 con infiltración del año 2010.



Gráfica 17. Factores de seguridad para el perfil 1 con infiltración del año 2017.

Como se observa en la Tabla 24, y las gráficas 14, 15, 16 y 17, para la infiltración mensual producida por las lluvias del año 2004, en el perfil 1, el factor de seguridad se reduce de 1,62 (enero) a un promedio de 1,32 en el mes de mayo y la tendencia continúa de esta manera hasta noviembre, donde se espera que el factor de seguridad llegue a un promedio de 1,12; es decir con la infiltración de este año, el factor de seguridad tuvo una reducción total del 30,9%.

Luego en el 2007, el factor de seguridad pasó del esperado 1,62 para épocas secas a 1,28 en mayo y siguió descendiendo hasta alcanzar un valor promedio de 0,98 en noviembre. Aquí



la reducción total fue del 39,48%. En el 2010, la reducción del factor de seguridad pasa del esperado 1,62 un promedio de 1,32 en mayo y finaliza con el factor de seguridad más bajo registrado en todas las modelaciones, un 0,78 promedio en noviembre, la infiltración para el año 2010 entonces, consiguió reducir el factor de seguridad en un 51,8%.

Más recientemente, en el 2017, año en el que no se presentó el fenómeno de La Niña, la infiltración redujo el factor de seguridad a 1,43 en agosto y finalmente a 1,39 en noviembre, es decir la reducción total del factor de seguridad fue sólo del 14%.

En la Tabla 24, también se observa que en el año 2004, el perfil se mantuvo aparentemente estable hasta octubre, mientras que en noviembre se observa un estado de falla incipiente que pudo desencadenar los eventos de deslizamiento. En el año 2007, el perfil muestra una estabilidad aparente hasta agosto, en septiembre se tiene un estado de falla incipiente, finalmente en octubre y noviembre se da un estado de falla inminente.

En el 2010 se presenta el escenario de estabilidad más crítico, donde el perfil se mantuvo aparentemente estable hasta agosto, luego en septiembre se observa un estado de falla incipiente y en octubre y noviembre presentan un estado de falla inminente siendo noviembre el mes que más influyó en el proceso de inestabilidad. Por el contrario, en 2017 el perfil mostró una condición estable y aparentemente estable todos los meses lluviosos.

Por otra parte, en la Tabla 24, se observa que un escenario combinado de infiltración por lluvias y un evento sísmico el perfil presenta una condición de inestabilidad incluso en el año 2017. Con esta combinación se obtuvo una reducción total del factor de seguridad en el año 2004 de aproximadamente 43,9%, en el año 2007 la reducción fue alrededor del 51,69%, en el 2010 se redujo el factor de seguridad aproximadamente del 60,5% y finalmente en el año 2017 la reducción fue del 29,7%.

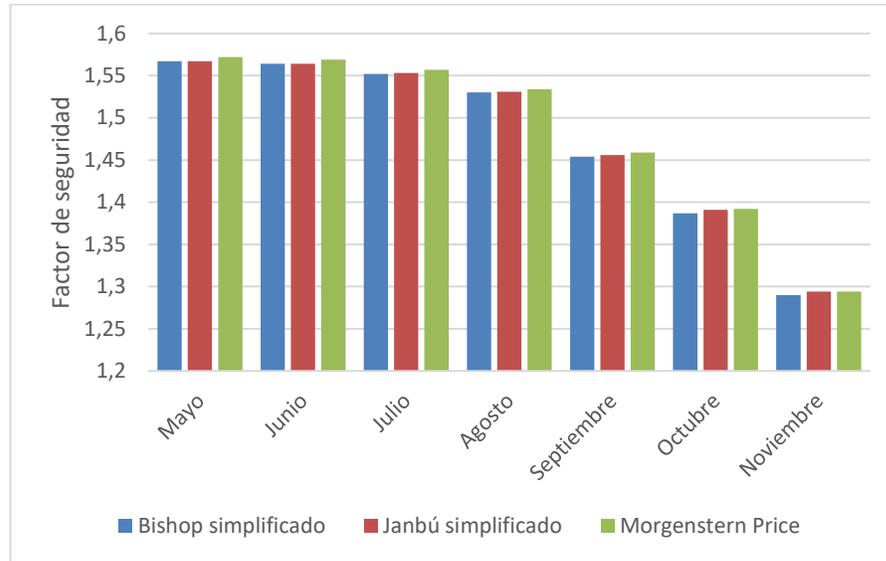


- **Factores de seguridad del perfil 2**

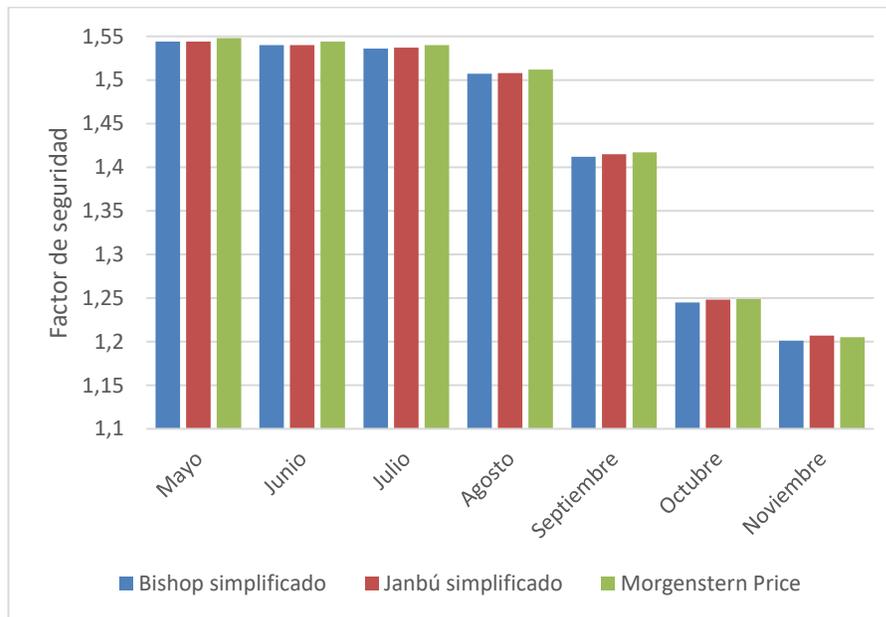
Tabla 25. Factores de seguridad del perfil 2 con incidencia de la infiltración.

Año	Mes	PERFIL 2 CON INFILTRACIÓN			PERFIL 2 CON INFILTRACIÓN Y SISMO		
		Modelo de equilibrio límite			Modelo de equilibrio límite		
		Bishop simplificado	Janbú simplificado	Morgenstern Price	Bishop simplificado	Janbú simplificado	Morgenstern Price
2004	Mayo	1,567	1,567	1,572	1,319	1,314	1,314
	Junio	1,564	1,564	1,569	1,316	1,311	1,311
	Julio	1,552	1,553	1,557	1,306	1,302	1,302
	Agosto	1,53	1,531	1,534	1,287	1,283	1,283
	Septiembre	1,454	1,456	1,459	1,223	1,221	1,219
	Octubre	1,387	1,391	1,392	1,167	1,165	1,163
	Noviembre	1,29	1,294	1,294	1,083	1,083	1,081
2007	Mayo	1,544	1,544	1,548	1,299	1,295	1,295
	Junio	1,5401	1,5401	1,5441	1,2951	1,2911	1,2911
	Julio	1,536	1,537	1,54	1,294	1,29	1,29
	Agosto	1,507	1,508	1,512	1,269	1,265	1,265
	Septiembre	1,412	1,415	1,417	1,188	1,186	1,184
	Octubre	1,245	1,248	1,249	1,047	1,045	1,045
	Noviembre	1,201	1,207	1,205	1,009	1,009	1,008
2010	Mayo	1,569	1,569	1,574	1,321	1,316	1,316
	Junio	1,518	1,519	1,522	1,277	1,273	1,273
	Julio	1,486	1,488	1,49	1,25	1,247	1,245
	Agosto	1,48	1,482	1,484	1,245	1,242	1,241
	Septiembre	1,354	1,358	1,359	1,138	1,136	1,136
	Octubre	1,242	1,246	1,246	1,043	1,043	1,04
	Noviembre	1,078	1,084	1,083	0,905	0,906	0,904
2017	Agosto	1,691	1,691	1,694	1,423	1,418	1,417
	Septiembre	1,683	1,684	1,687	1,416	1,412	1,411
	Octubre	1,654	1,653	1,659	1,392	1,386	1,388

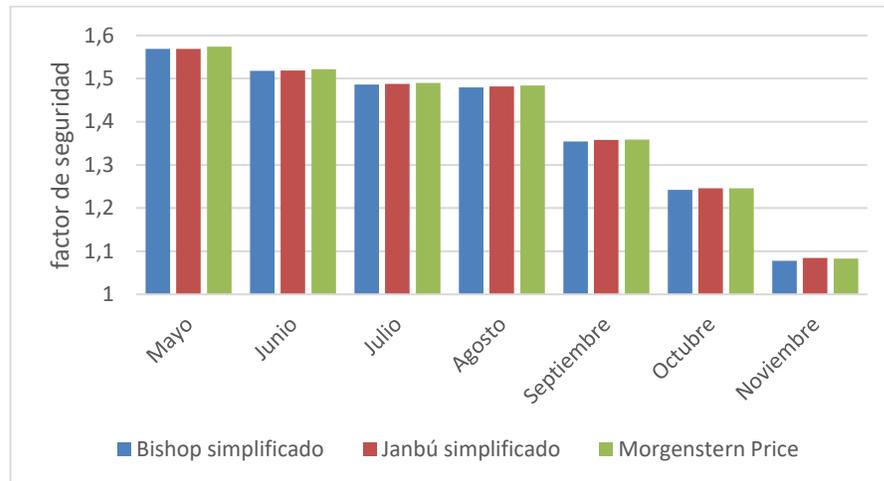
Fuente: autores.



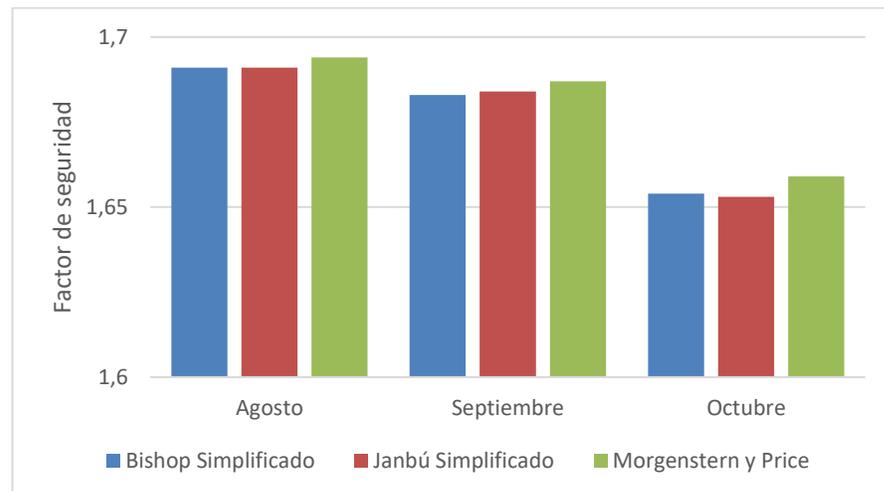
Gráfica 18. Factores de seguridad para el perfil 2 con infiltración (2004).
Fuente: autores.



Gráfica 19. Factores de seguridad para el perfil 2 con infiltración (2007).
Fuente: autores.



Gráfica 20. Factores de seguridad para el perfil 2 con infiltración (2010).
Fuente: autores.



Gráfica 21. Factores de seguridad para el perfil 2 con infiltración (2017).
Fuente: autores.

En la Tabla 25, las gráficas 18, 19, 20 y 21, se observa que en el perfil 2 la infiltración mensual producida por las lluvias del año 2004, redujo el factor de seguridad de 1,77 (enero) a un promedio de 1,57 en el mes de mayo y la tendencia continúa de esta manera hasta noviembre, con factor de seguridad promedio de 1,29; es decir con la infiltración de este año, el factor de seguridad tuvo una reducción total del 27,12%.

Luego en el 2007, el factor de seguridad pasó del esperado 1,77 para épocas secas a 1,55 en mayo y siguió descendiendo hasta alcanzar un valor promedio de 1,2 en noviembre. Aquí la reducción total fue del 32,2%. En el 2010, la reducción del factor de seguridad inicia con un



promedio de 1,57 en mayo y se reduce hasta 1,08 en noviembre en promedio, la infiltración para el año 2010 entonces, consiguió reducir el factor de seguridad en un 38,98%. En el 2017 la infiltración redujo el factor de seguridad a 1,69 en agosto y finalmente a 1,65 en noviembre, es decir la reducción total del factor de seguridad fue sólo del 6,79%.

En la Tabla 25 también se observa que en los años 2004 y 2007, el perfil se mantuvo estable hasta agosto, y a partir de allí hasta noviembre la condición es aparentemente estable. En el año 2010, el perfil se muestra estable hasta junio, aparentemente estable en desde julio hasta octubre y finaliza con un estado de falla incipiente en noviembre que pudo no generar deslizamientos en esta zona. En el año 2017 el perfil mostró una condición estable incluso en los meses lluviosos.

Finalmente, en la Tabla 25 se observa que un escenario combinado de infiltración por lluvias y un evento sísmico el perfil 2 presenta en el año 2004 una condición aparentemente estable de mayo a septiembre, a partir de allí la condición es inestable hasta noviembre. En los años 2007 y 2010 la condición aparentemente estable va de mayo a julio y luego es inestable hasta noviembre. Sin embargo en el 2010 al finalizar noviembre el perfil se encontraría en estado de falla inminente.

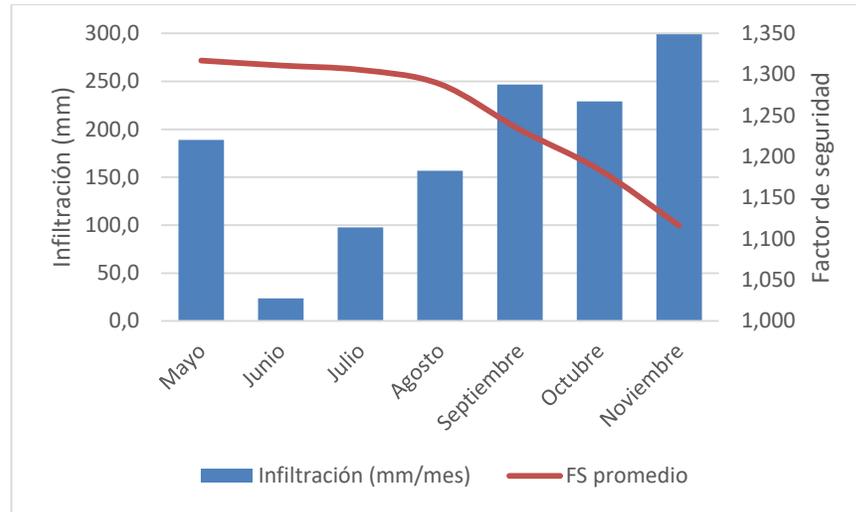
Con esta combinación se obtuvo una reducción total del factor de seguridad en el año 2004 de aproximadamente 38,98%, en el año 2007 la reducción fue alrededor del 43,5%, en el 2010 se redujo el factor de seguridad aproximadamente del 48,02% y finalmente en el año 2017 la reducción fue del 25,42%.

5.3.2.3 Factores de seguridad VS infiltración

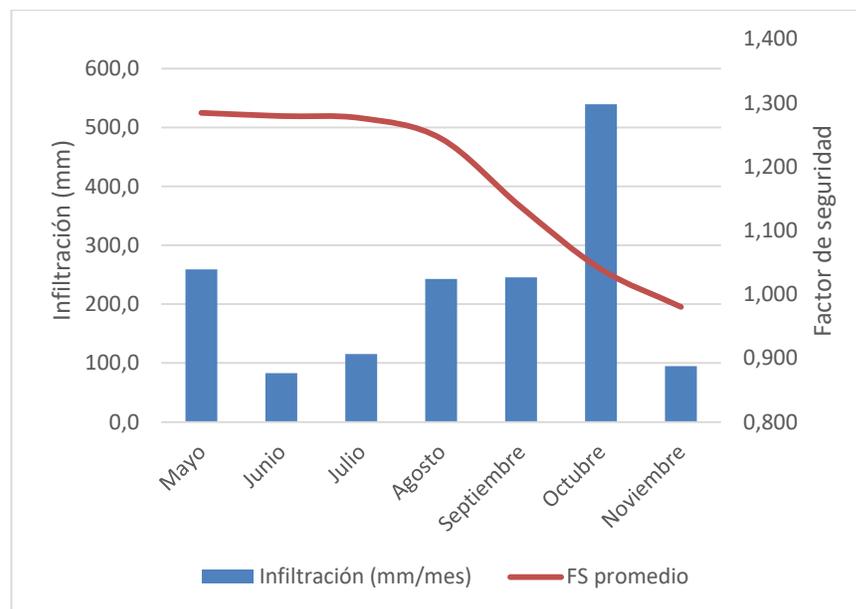
En las siguientes gráficas (de la 22 a la 29), se observa que el descenso del factor de seguridad promedio mensual es inversamente proporcional a la cantidad de precipitación y su consecuente infiltración, éste se reduce significativamente en mayo (como se vio en la sección anterior); tiene un ligero ascenso en junio por el veranillo (a excepción del año 2010 donde este mes fue muy lluvioso), y vuelve a tener un descenso en julio con el aumento de las lluvias, posteriormente continúa el comportamiento de disminución hasta el mes de octubre o noviembre donde la mayoría de veces se alcanza el mayor pico de lluvia.



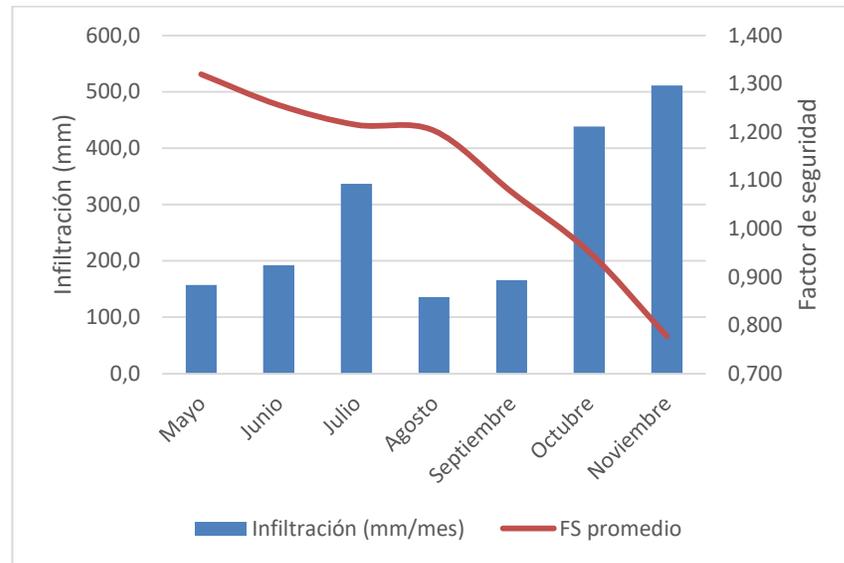
• Perfil 1



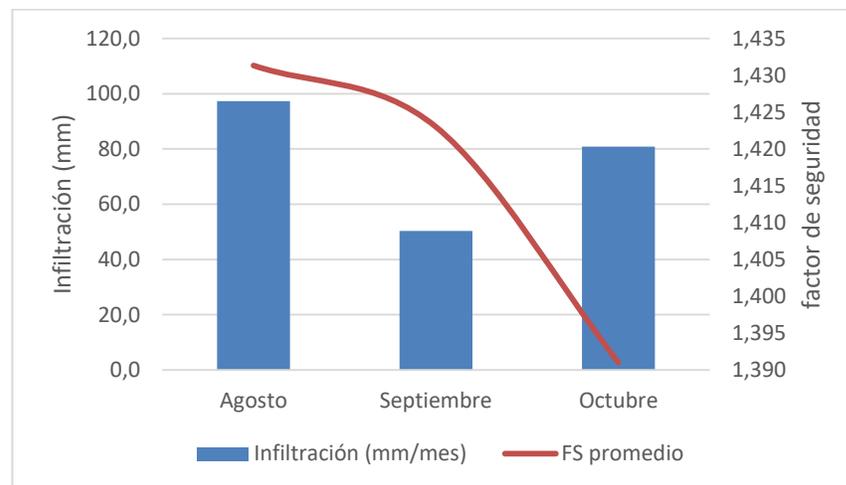
Gráfica 22. Infiltración VS. Factor de seguridad en el perfil 1 (año 2004).
Fuente: autores



Gráfica 23. Infiltración VS. Factor de seguridad en el perfil 1 (año 2007).
Fuente: autores



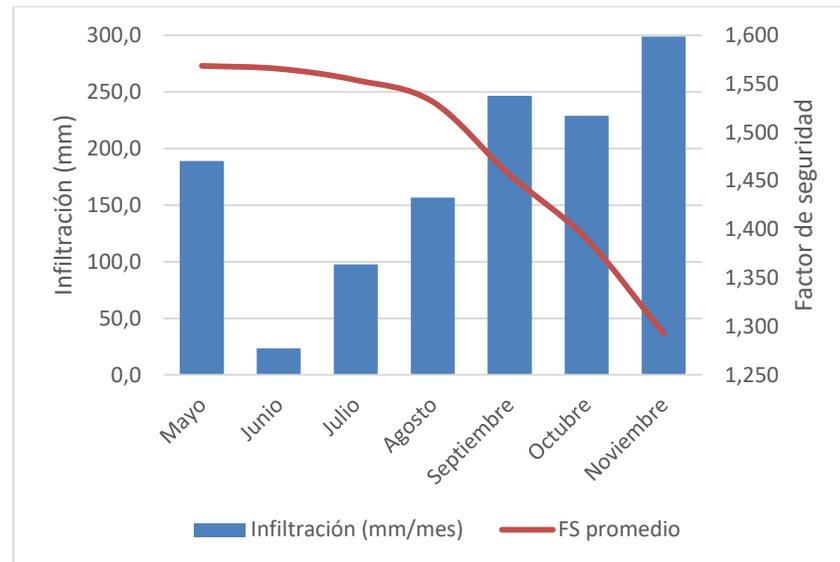
Gráfica 24. Infiltración VS. Factor de seguridad en el perfil 1 (año 2010).
Fuente: autores.



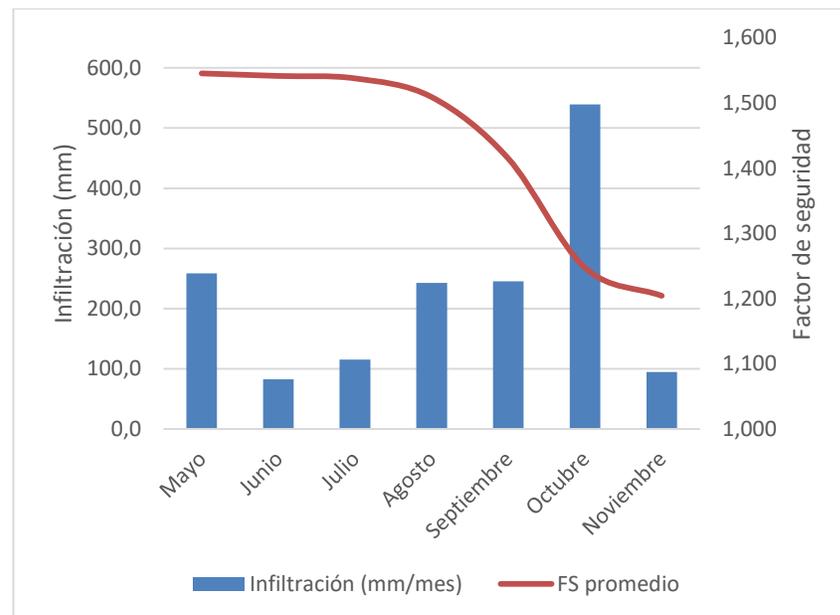
Gráfica 25. Infiltración VS. Factor de seguridad en el perfil 1 (año 2010).
Fuente: autores.



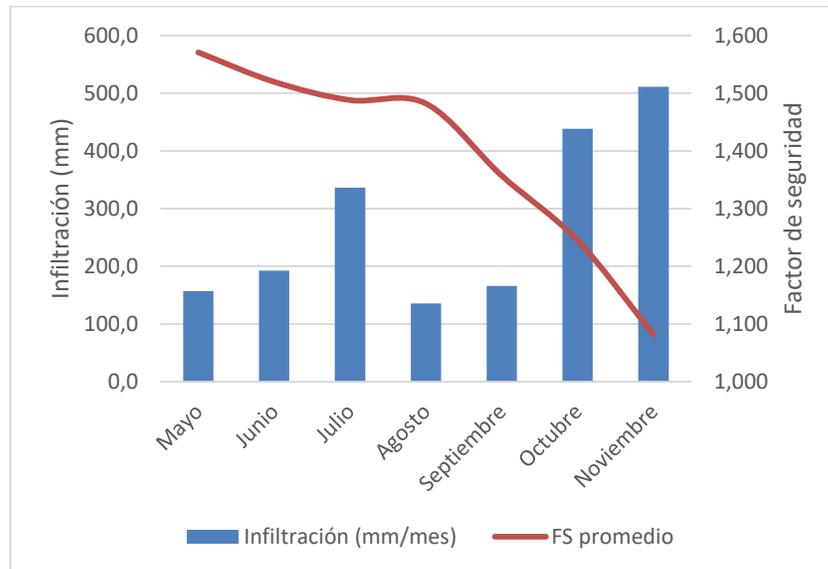
- Perfil 2



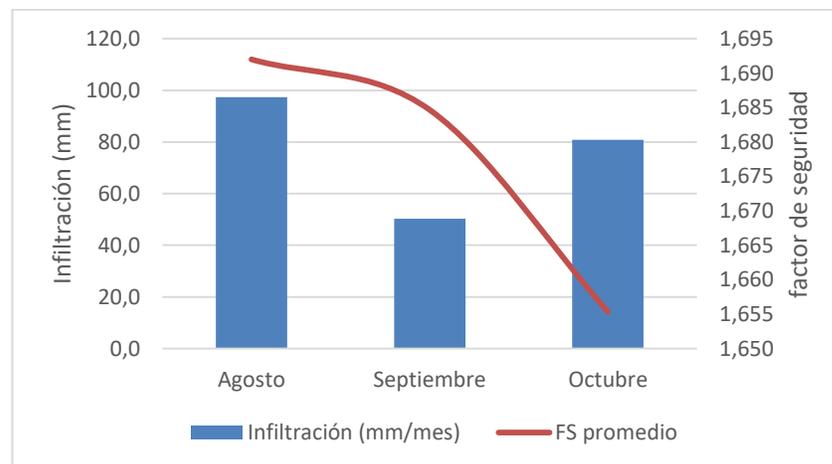
Gráfica 26. Infiltración VS. Factor de seguridad en el perfil 2 (año 2004).
Fuente: autores.



Gráfica 27. Infiltración VS. Factor de seguridad en el perfil 2 (año 2007).
Fuente: autores.



Gráfica 28. Infiltración VS. Factor de seguridad en el perfil 2 (año 2010).
Fuente: autores.



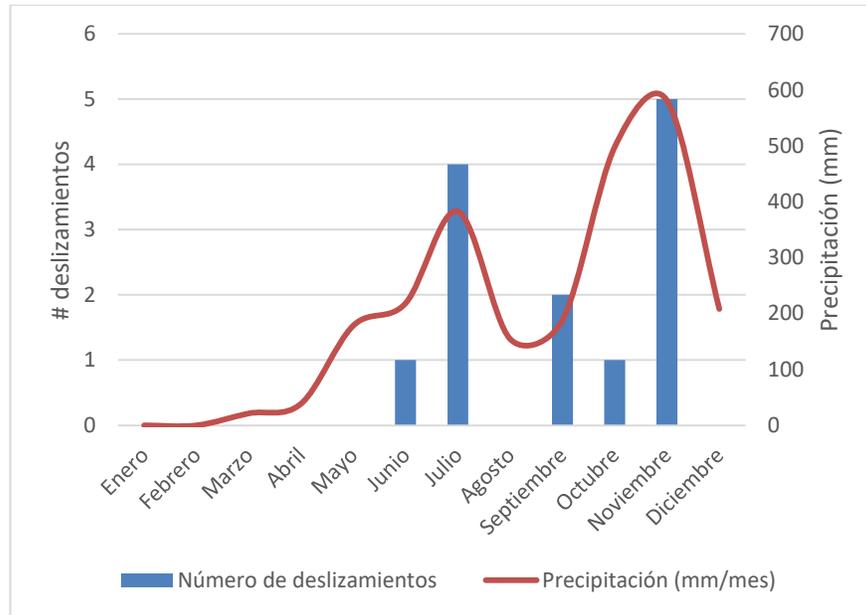
Gráfica 29. Infiltración VS. Factor de seguridad en el perfil 2 (año 2017).
Fuente: autores.

• LLUVIA Y DESLIZAMIENTOS

Debido a la poca información disponible sobre eventos de deslizamientos en el Salto del Cabrón, más de aquella que pueden recordar los habitantes del sector, se realizó una recolección de deslizamientos presentados en el Cerro de La Popa y barrios aledaños en el año 2010 (ver Anexo 1) y se comprobó la directa relación que tiene la lluvia como detonante en estos fenómenos, siendo julio y noviembre los meses cuya precipitación generó más deslizamientos en el Cerro. Sin embargo esta actividad no pudo realizarse en el Salto del Cabrón, por lo que se tiene como referencia los factores de seguridad con



valor cercanos o menores a la unidad en los meses de Octubre y Noviembre en los años 2004, 2007 y 2010, que confirman que sí hubo deslizamientos en esta zona en esos años, de acuerdo con Murcia Cañón y Carvajal Perico (2017).



Gráfica 30. Precipitación mensual VS. Eventos de deslizamiento en el Cerro de La Popa (año 2010).

5.3.3 Resultado de la modelación del cambio de la superficie en ArcGIS V.10.1

Entre los años 2004 a 2017 se ha conservado la morfoestructura característica del Salto del Cabrón descrita en el literal 5.1.1. A continuación, se muestran imágenes de pendientes correspondientes para los años 2004, 2009 y 2017.

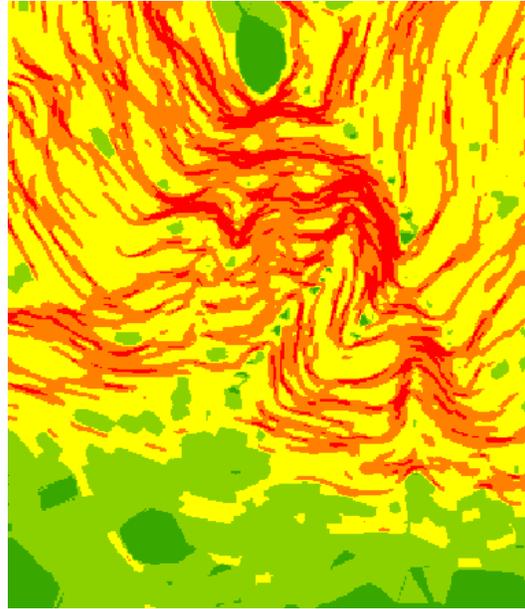


Figura 47. Pendientes (en grados) del Salto del Cabrón año 2004.

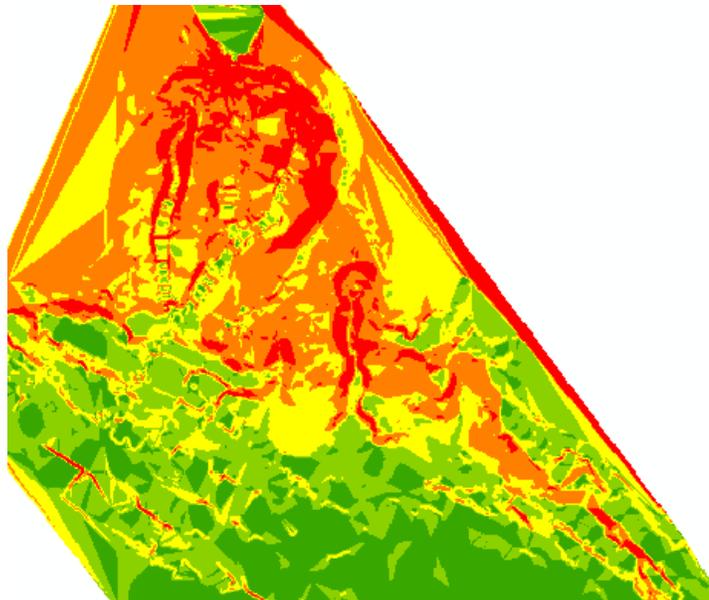


Figura 48. Pendientes (en grados) del Salto del Cabrón año 2009.

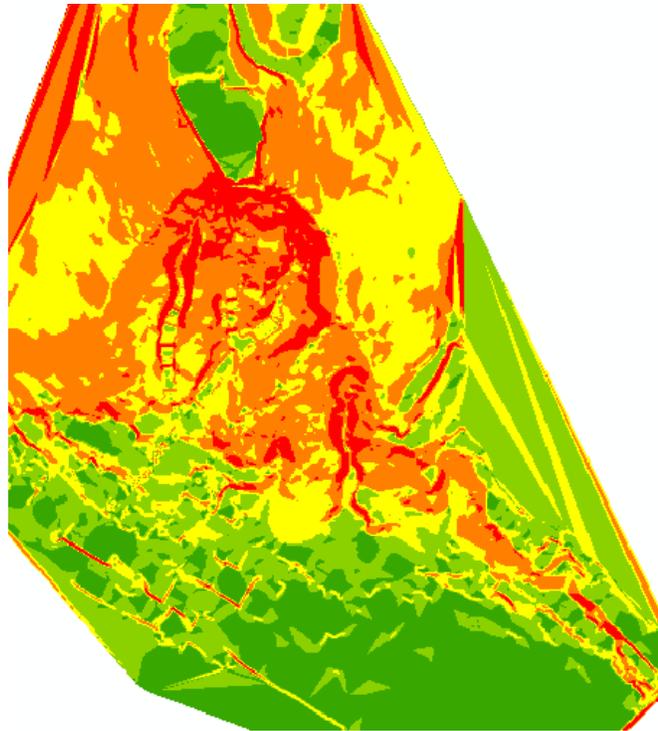


Figura 49. Pendientes (en grados) del Salto del Cabrón.

De los mapas anteriores, y teniendo en cuenta la siguiente clasificación de pendientes propuesta por la Universidad de Cartagena (2017) (ver Tabla 26), se puede observar que entre los años 2004 y 2017 no se han presentado cambios significativos en las pendientes del Salto del Cabrón. La distribución de pendientes, teniendo en cuenta la ubicación de las geoformas de la zona de estudio, siguen siendo las mismas.

Se pueden presentar pequeños cambios en las pendientes correspondientes a la unidad geomorfológica laderas de contrapendiente de cuesta disecada (Sccpd), y dentro de la cárcava central de la ladera, de unidad geomorfológica que corresponde a Cicatriz de erosión y deslizamiento (Dced), debido a que allí se distribuyen las laderas moderadas y empinadas, y que se acentúan más debido a los procesos erosivos y de remoción de masas. Litológicamente corresponde a materiales productos de coluviones calcáreos (ClvCa), limos arenosos calcáreos (LimACal) y Arcillolitas con niveles limosos y arenosos (ArcLim).



Tabla 26. Clasificación de pendientes en la zona del Salto del Cabrón

PENDIENTES (°)	DESCRIPCIÓN
0 a 5	Baja
5 a 15	Media
15 a 30	Moderada
30 a 45	Alta
>45	Muy Alta

Fuente: Universidad de Cartagena, 2017

A continuación, se muestra el cambio de superficie en el Salto del Cabrón a Través de las pendientes, entre los años 2009 y 2017.

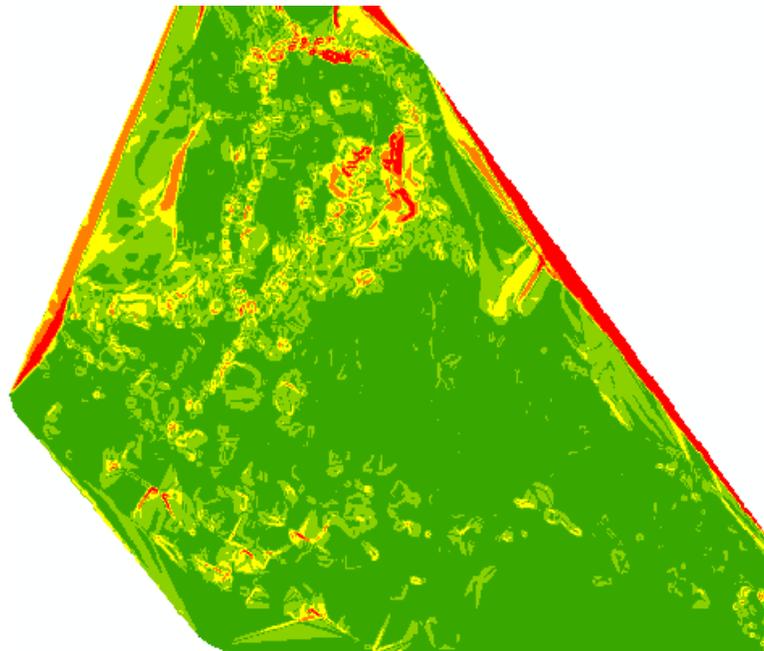


Figura 50. Variación de las pendientes entre los años 2009 y 2017.



Figura 51. Zona donde se han presentado los mayores cambios de pendientes.
Fuente: tomado (Universidad de Cartagena, 2017) y modificado por los autores.

De acuerdo a la Figura 50, se observa cambios significativos en las pendientes correspondientes a la parte derecha y parte alta de la Cárcava central de la ladera, de unidad geomorfológica cicatriz de erosión y deslizamiento (Dced). En esta se puede notar que las pendientes han aumentado entre 15 a más de 45 grados (color amarillo, naranja y rojo), es decir, de moderadas a muy altas, productos de los procesos morfodinámicos que se dan allí, como lo son escarpes erosivos y erosión en cárcavas (ver Figura 51).

También, dentro de la Cárcava central, en la parte correspondiente a la unidad geomorfológica Lomos denudacionales (Dles) y en los canales que descienden de esta, se evidencia aumento de las pendientes entre 5 a 30 grados (color verde y amarillo), es decir, de medias a moderadas, producto también de los procesos morfodinámicos, como escarpes erosivos y erosión en surcos.

En la unidad geomorfológica correspondiente a laderas de contrapendiente de cuesta disecada (Sccpd), se observa que las pendientes han sufrido cambios entre 5 a 30 grados, es decir de medias a moderadas (color verde claro y amarillo), como producto a procesos de remoción de masas y de erosión, acentuando los escarpes erosivos que se localizan allí.



En la unidad geomorfológica correspondiente a paleoacantilados (Mpa), no hubo cambios significativos. La zona se encuentra en su mayoría en color verde oscuro, es decir, que hubo cambio de pendientes entre 0 y 5 grados. En algunas zonas se encuentra de color verde claro y amarillo, que indica cambios de pendiente entre 5 a 30 grados, esto debido a los procesos morfodinámicos presentes en esa zona, como escarpes erosivos, erosión en surcos y en Cárcavas.

La zona correspondiente a la unidad geomorfológica de conos de deslizamiento y avalancha ha presentado cambios de pendientes en general entre 0 y 5 grados, es decir, pendientes bajas. En algunas zonas se encuentran cambios entre 5 a 30 grados, que se evidencian en zonas de color verde claro y amarillo.

En general, la zona del Salto del Cabrón y su área de influencia entre los años 2009 y 2017, no ha tenido cambios significativos en las pendientes, la mayoría de la zona se encuentra de color verde oscuro, es decir, que ha habido cambios de pendientes entre 0 y 5 grados.

Las zonas de color naranja y rojo que se muestran en los costados derecho e izquierdo y la zona superior de la Cárcava central de la Figura 50, no se toman en cuenta y se excluyen de la descripción, debido a que la topografía en esa parte no brinda la suficiente información como para determinar los verdaderos cambios de pendientes en esa zona, y por ende, la asume así de ese modo.

5.3.4 Comparación con estudios previos y literatura existente

En esta investigación se obtuvo resultados en cuanto a la revisión de la estabilidad de taludes que coinciden con lo hallado en la literatura pertinente, pues en la revisión realizada por Aristizábal E., Martínez H. & Vélez J. (2010), se sostiene que según Rahardjo (2007) la magnitud y rata de reducción en el factor de seguridad (FS) es directamente proporcional a la magnitud de la intensidad de lluvia, a mayor intensidad más rápidamente decrece el factor de seguridad.

De esta manera, los factores de seguridad en el Salto del Cabrón están fuertemente relacionado con el comportamiento de las temporadas húmedas, teniendo un gran descenso en mayo donde ocurre el primer pico lluvioso y se mantiene con esa tendencia hasta casi



finalizar el año, posiblemente porque el suelo conserva humedad entre los dos picos lluviosos. También se debe aclarar que las oleadas invernales (2004, 2007 y 2010) fueron las que impactaron negativamente el factor de seguridad, en años más secos como el 2017 el factor de seguridad es estable.

También se verificó que los factores de seguridad promedio de 1,62 y 1,77 para cada perfil respectivamente, coinciden con el valor de 1,5 estimado por Covo Torres (2005) con diferencias de 7% y 15% aproximadamente. Los factores de seguridad en las faldas del talud (cota 27 a cota 10) se mantuvieron con valores promedio de 4,66, 2,67 y 6,42 respectivamente para los perfiles 1, 2 y 3, los cuales se asemejan a los obtenidos por la Universidad de Cartagena (2009) en la parte baja de la zona de estudio con valores de entre 2,78 y 5,74.

Por otra parte, a pesar que se carece de información concreta de eventos de deslizamientos en el sector del Salto del Cabrón, el comportamiento de los deslizamientos registrados en el año 2010 en el Cerro de La Popa, en relación con la lluvia de ese año, se asemeja mucho a lo que ocurre en otras ciudades del país, pues en la ciudad de Bogotá en los períodos abril-mayo y noviembre-diciembre coinciden tanto las máximas precipitaciones como la mayor cantidad de movimientos en masa, presentándose el más alto número en el segundo periodo lluvioso del año (Ramos, Trujillo-Vela, & Prada, 2015).

En la ciudad de Medellín sucede algo similar; el primer pico lluvioso del año (de abril a junio) no presenta un elevado número de deslizamientos, comparados con los que ocurren en el segundo periodo (septiembre a noviembre). Esto puede explicarse por el almacenamiento de humedad en el suelo debido a la infiltración. Los deslizamientos del primer pico lluvioso no son tan elevados debido a que el suelo se deshace del agua almacenada en la temporada anual más seca (diciembre, enero y febrero) a diferencia del veranillo de mitad de año que no es completamente seco (Moreno, Vélez, Montoya, & Rhenals, 2006).

La pendiente y el tipo de vegetación también juegan un papel importante en la estabilidad de taludes expuestos a eventos de lluvia, tal caso fue también verificado por Ramos, Trujillo-Vela, & Prada (2015) en Bogotá, donde la mayor cantidad de deslizamiento se concentró en los taludes de 6 de las 9 zonas estudiadas, los cuales se caracterizaron por poseer pendientes



de 40° (aproximadamente) y estar cubiertos por arbustos y gramíneas, tal y como sucede en el Salto del Cabrón.

En cuanto a la variación de la superficie, Murcia Cañón & Carvajal Perico (2017) sostienen que la gran cicatriz de erosión y deslizamiento ubicada en la parte central de la zona, se sigue desfavoreciendo debido a la erosión acentuada y retrogresiva y el flujo de detritos, tal y como se evidencia en esta investigación, justo en esas zonas es donde se observa el mayor cambio de pendientes, lo cual es signo de que la cárcava central se ha ampliado. También, de acuerdo con INGEOMINAS (2001) las laderas de contrapendiente de la cuesta disectadas, han sido afectadas por la acción antrópica, asociada, tanto con la explotación de canteras (hoy abandonadas), como la colonización antitécnica de las mismas, favoreciendo así a la formación de escarpes erosivos, y se evidencia también en esta unidad geomorfológica el cambio de pendientes de medias a moderadas, acentuando así los escarpes erosivos que se encuentran en esa zona.



6. CONCLUSIONES

El desarrollo de la presente investigación condujo a un análisis cualitativo y cuantitativo de la incidencia de los factores contribuyentes externos e internos y detonantes que han incidido en los procesos de inestabilidad del Salto del Cabrón y su área de influencia entre los años 2004 y 2017, mediante la recopilación de información secundaria y el desarrollo de modelaciones computacionales en las que se tuvo en cuenta dichos factores, para obtener los factores de seguridad y el cambio de la superficie en la zona de estudio, lo que permitió establecer las siguientes conclusiones:

- El Salto del Cabrón y su área de influencia se localiza en la formación Popa y en depósitos de coluvión de origen marino-transicional. La unidad calcárea compuesta por rocas calizas arrecifales en la parte superior del talud se encuentran con alto grado de porosidad; muy meteorizadas y fracturadas, lo que la hace una roca con competencias débiles y susceptibles a procesos morfodinámicos como caído de bloques. La unidad detrítica compuesta por limos y arcillas con lentes arenosos de media a alta plasticidad y predominante en la gran cárcava o cicatriz de erosión y deslizamiento en la parte media y baja de la ladera, presentan diaclasas y grietas de desecación debido a los cambios de humedades, lo que lo hacen materiales altamente erodables.
- Topográficamente, la zona más crítica del Salto del Cabrón es la gran cicatriz de deslizamiento y erosión o Cárcava central, presentando pendientes de moderadas (entre 15 a 30°) a muy altas (más de 45°), que son acentuadas por los fenómenos denudativos.
- En la corona de deslizamiento (en la parte media del Salto del Cabrón), la vegetación está compuesta por arbustos, matorrales, y vegetación esclerófila o espinosa que se ha deteriorado posiblemente desde la explotación de canteras (años 60). La vegetación en la parte baja de la cárcava del Salto del Cabrón ha sufrido un deterioro progresivo, llegando a perder cerca de 0,13 Ha entre los años 2005 y 2018.
- El estrato de calizas fue considerado como zona potencial de recarga por sus bajas pendientes (<5 grados) que favorecen la infiltración, se considera que podría



conformar un acuífero de tipo libre por porosidad secundaria. A su vez, este nivel superior puede generar, gracias a sus discontinuidades, un flujo preferentemente vertical hacia el estrato de limolitas calcáreas y el nivel de arcillolitas inferiores.

- El análisis cualitativo de la actividad antrópica en el Salto del Cabrón reveló que los asentamientos por viviendas no han aumentado en gran medida entre 2004 y 2017, pues los barrios El Toril y La Quinta conservan en gran medida su composición original desde hace más de 50 años. El 90% de los habitantes asegura tener al menos 18 años viviendo en la zona. En el año 2005 se observan viviendas hasta la cota 32, sin embargo, actualmente existen casas improvisadas en la cota 37 aproximadamente, lo que sugiere que la invasión continúa, aunque sea de forma muy paulatina.
- El análisis de estabilidad general (sin incidencia de la infiltración) demostró que los perfiles 1 y 2 mantienen una estabilidad satisfactoria con factores de seguridad promedio de 1,62 y 1,77 respectivamente. Sin embargo, en el perfil 3, el factor de seguridad fue de 1,45, valor que indica una mayor susceptibilidad ante fenómenos denudativos.
- La lluvia es el factor detonante que más afecta la estabilidad, puesto que las infiltraciones producidas por precipitaciones redujeron significativamente el factor de seguridad en los perfiles 1 y 2, siendo el mes de noviembre el más crítico en todos los años de diseño. Por ejemplo, en el perfil 1 el factor de seguridad se redujo en un 30,9% en noviembre del año 2004 (de 1,62 a 1,12); un 39,48% en noviembre del año 2007 (de 1,62 a 0,98) y un 51,8% en el mes de noviembre del año 2010 (de 1,62 a 0,78), siendo este último resultado el más crítico de todas las modelaciones. Sin embargo, en años relativamente secos como el 2017, el factor de seguridad se mantuvo estable en los perfiles 1 y 2 durante todos los meses de lluvia, la máxima reducción se obtuvo en el perfil 1 para el mes de noviembre y fue sólo del 14% (de 1,62 a 1,39).
- La intervención antrópica por asentamientos no impacta significativamente la estabilidad de los perfiles, pues la sobrecarga del convento redujo los factores de seguridad 2,4% (de 1,66 a 1,62) y 2,2% (de 1,81 a 1,77) para los perfiles 1 y 2 respectivamente. Las sobrecargas producto de los asentamientos por viviendas en las



faldas del talud disminuyeron el factor de seguridad en un 12% (de 7,25 a 4,13) en el perfil 1 y un 22% (de 8,25 a 6,42) en el perfil 3.

- En general no hubo cambios en la superficie del Salto del Cabrón. La morfoestructura y la distribución de pendientes en las unidades geomorfológicas de la zona de estudio sigue siendo la misma entre los años 2004 y 2017. Se observa cambios de pendientes en una parte que abarca la zona derecha de unidad geomorfológica cicatriz de erosión y deslizamiento o la cárcava central. El cambio de pendiente se dio entre los 30 a más de 45 grados (pendientes de moderadas a muy altas). Lo anterior debido a los procesos morfodinámicos erosivos que se dan en esa unidad geomorfológica que aumentan los escarpes erosivos.

En general, la lluvia es el factor detonante que más afecta la estabilidad del Salto del Cabrón, dado los factores de seguridad obtenidos, sin embargo esta zona tiene las condiciones necesarias, que en conjunto, generan su desestabilización como son las altas pendientes, cicatrices de procesos denudativos, intervención antrópica desde hace más de 60 años y pérdida de vegetación sostenida. La incidencia que estos factores tienen sobre la estabilidad del Salto del Cabrón (a excepción de la infiltración) guardan, como se ha visto en la sección 5.3.4, similitud con los resultados de investigaciones realizadas previamente por la Universidad de Cartagena (2009 y 2017), Murcia Cañón & Carvajal Perico (2017) y Covo Torres (2005).

Finalmente, este estudio es de suma importancia porque incentiva la investigación del riesgo en zonas con amenazas de movimientos en masa para la prevención y el control de desastres naturales. Además constituye un primer acercamiento al modelamiento de la lluvia y su influencia sobre la desestabilización de laderas en el Salto del Cabrón, lo cual puede dar apoyo a las autoridades en prevención de desastres para declarar estados de alerta ante condiciones de amenaza. Por último esta investigación permite ampliar la literatura de la estabilidad de taludes y los factores que inciden en esto, y sirve como base para futuras evaluaciones o intervenciones que se lleguen a realizar en la zona estudiada.



7. LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se describen las limitaciones que se presentaron en el desarrollo del proyecto y las respectivas recomendaciones para las investigaciones futuras relacionadas con la incidencia de los factores contribuyentes (internos y externos) y detonantes en la desestabilización de taludes.

7.1 LIMITACIONES EN EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

Entre las limitaciones más importante encontradas en esta investigación, se tiene la carencia de información precisa de eventos de deslizamiento en el Salto del Cabrón en cuanto a fechas y localizaciones, así como la falta de información de las lluvias diarias en los años escogidos para desarrollar el estudio; lo que hace difícil hallar una correlación de la cantidad de lluvia con la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa que coincida con los valores obtenidos de factor de seguridad en cada perfil.

Por otra parte, no se cuenta con información verificada de algunos parámetros geotécnicos del estrato de calizas, como son la cohesión, el ángulo de fricción interna y la permeabilidad, puesto que no se cuenta con los equipos necesarios para desarrollar ensayos de corte directo en los planos de debilidad de la roca, ni para calcular la permeabilidad in situ sin alterar sus propiedades mecánicas. Por lo tanto estos factores tuvieron que ser asumidos de la literatura existente, con base en criterios como la resistencia a la compresión de la roca estimada por la Universidad de Cartagena (2017).

Por último, no se pudo determinar con exactitud la variación de las pendientes del talud del Salto del Cabrón entre 2004 y 2009, debido a que el levantamiento topográfico del año 2004 era muy poco preciso (curvas de nivel cada dos metros), no se encontraba en las mismas coordenadas de los levantamientos de 2009 y 2017, y al intentar modificarlo, los datos arrojados por el software ArcGIS V.10.1 no fueron satisfactorios.



7.2 RECOMENDACIONES EN CUANTO A LAS LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Se recomienda a entidades como la Oficina de Gestión de Riesgo de Cartagena, implementar planes estructurados que permitan monitorear los deslizamientos futuros en el Salto del Cabrón y en general de todas las áreas que presenten susceptibilidad a procesos de remoción en masa en la ciudad de Cartagena. También se recomienda continuar esta investigación haciendo análisis de lluvia crítica, con el fin de poder generar umbrales de lluvia asociados a deslizamientos. Por último, también es necesario realizar estudios técnicos para la implementación de una red de pluviómetros en el Salto del Cabrón y todo el Cerro de La Popa. Todo lo anterior debe procurar la creación de Sistemas de Alerta Temprana, para prevenir a la población de la proximidad de un evento destructivo, y así aplicar medidas anticipadas y efectivas, para reducir o evitar la pérdida de vidas y daños materiales.

Por otra parte, se recomienda realizar los ensayos geotécnicos mencionados en la sección anterior para conocer el comportamiento geomecánico e hidrológico real en el estrato de calizas, como zona crítica debido a la amenaza de caída de bloques por infiltración y apertura de grietas.

7.3 RECOMENDACIONES CONCEPTUALES DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN

En cuanto a las zonas de pérdida de vegetación recientes y antiguas, ubicadas en la cárcava central y las faldas del Salto del Cabrón, se recomienda implementar las soluciones propuestas por la Universidad de Cartagena (2004, 2009 y 2017) que consisten en la revegetalización de estas áreas con especies nativas (Marratón), con distancia de plantación entre 1,5 y 3 metros (Suárez Díaz J. , 1998).

De acuerdo con la Universidad de Cartagena (2009), para controlar la erosión en el flanco derecho de la cárcava central (zona que ha tenido los mayores cambios de pendiente) se recomienda la implementación de obras de bioingeniería con biomantos; para el control de erosión y flujo de sedimentos en las cárcavas que se encuentran en las faldas del talud



(paleoacantilados), se recomienda la implementación de trinchos con estacas de madera u obras con biomantos (Sacos de Fiques) y tallos de Vetiver.

Se debe aclarar que recuperar las zonas de la parte baja del talud incluye el desalojamiento reubicación de las dos viviendas que se encuentran entre las cotas 35 y 37. Por tanto se recomienda a la Alcaldía Mayor de Cartagena, implementar planes estructurados de asistencia con vivienda a estas personas, a la vez que se impida el aumento de las invasiones en el sector.

Se recomienda adoptar soluciones para disminuir la recarga por infiltración en el estrato de calizas. Se debe hacer un plan de manejo de aguas pluviales en el Convento, de tal manera que ésta sea recolectada y evacuada adecuadamente con alternativas como la propuesta por la Universidad de Cartagena (2017) que consiste en un sistema de canales perimetrales que descarguen las aguas a la parte oriental del cerro. También se debe procurar la impermeabilización de todos los techos, patios y aljibes del convento, así como la revisión de los sistemas de tuberías hidráulicas y de alcantarillado, a fin de asegurar de que estas no tengan filtraciones. Es de suma importancia que el vertimiento de aguas del convento sea controlado, no se debe verter el agua directamente sobre el Salto del Cabrón porque se incrementarían los procesos de erosión.



BIBLIOGRAFÍA

- Aristizabal, E., Martínez, H., & Vélez, J. (2010). UNA REVISIÓN SOBRE EL ESTUDIO DE MOVIMIENTOS EN MASA DETONADOS POR LLUVIAS. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas* , 209-227.
- Barrera, E., Muñoz, J., Colmenares, J., & Donado, L. (2003). *Análisis de la influencia de la distribución del tamaño de partículas en la conductividad hidráulica de arenas limpias*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Bocasnegras, Y., Paternina, Y., & Vergara, R. (2001). *Control de erosión producido por la escorrentía de aguas lluvias en el Cerro de La Popa, vertiente del Paseo Bolívar*. Universidad de Cartagena, Cartagena.
- Camacho Orozco, S., Ramos Cañón , A. M., Escobar Vargas, J. a., & Garzón González , A. F. (enero-junio de 2017). Análisis cuantitativo en la influencia de la geomorfología en la estabilidad de taludes. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13-28.
- CEELAT. (15 de Mayo de 2014). *LABORATORIO DE MAPEO*. Obtenido de Amenaza por remoción en masa en Colombia: <http://ceelat.org/mapas/amenaza-por-remocion-en-masa-en-colombia/>
- Clavijo, J., & et al. (2008). Evolución geológica de la serranía de san Lucas, norte del valle medio del magdalena y noroeste de la cordillera oriental. *Boletín de Geología*.
- Covo Torres, A. (2005). *Informe final de estudio geotécnico para la construcción de estructuras de retención para control de erosión en la falda Sur del Cerro de la Popa. Cartagena Bolívar*. Cartagena.
- EPTISA. (1987). *Manual de Taludes 1era edición*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Escobar Potes, C. E., & Duque Escobar, G. (2016). *Geotecnia para el trópico Andino*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology* (4ta edición ed.).
- Fonseca Pérez, J., & Ruiz Arboleda, J. (2015). *Evaluación del Comportamiento Geomecánico de los Taludes del sector Occidental de la Loma del Peyé, Casco urbano de Cartagena*. Universidad de cartagena, Cartagena.
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York: John Wiley and Sons, INC.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., & Widger, R. A. (1977). The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 313 - 321.
- GEU. (2010). *MACROPROYECTO URBANO PARA LA RECUPERACIÓN INTEGRAL DEL CERRO DE LA POPA EN LA CIUDAD DE CARTAGENA DE INDIAS*. BOGOTÁ D.C. – CARTAGENA.



- Giraldo Fernández, K., & Tejada Muñoz, A. (2016). *Análisis de estabilidad de taludes bajo condiciones de infiltración por lluvia*. Pontificia Universidad Javeriana de Cali, Santiago de Cali.
- Holdridge, L. R. (1997). *Diagrama para la clasificación de zona de vida o formaciones vegetales del mundo*. IGAC.
- INGEOMINAS. (2001). *Zonificación geotécnica y aptitud y uso del suelo en el casco urbano de Cartagena*. Cartagena: Ingeominas.
- INGEOMINAS. (2001). *Zonificación geotécnica, aptitud y uso del suelo en el casco urbano de Cartagena*. Bolívar, Cartagena.
- INGEOMINAS. (2012). *ESTUDIOS DE GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA ESCALA 1:25.000 PARA LA REUBICACIÓN DEL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE GRAMALOTE, DEPARTAMENTO NORTE DE SANTANDER VOLUMEN 1*. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.
- Lefranc. (1986). *Ensayos de Lefranc para la determinación de la permeabilidad de suelos y macisos rocosos*. Suelos y Fundaciones LTDA.
- Marín Tamayo, A. (2013). *Evaluación de la influencia de flujos concentrados en la estabilidad de taludes*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Martínez Vargas, A. (1990). *Geotecnia para ingenieros. Características generales de los materiales térreos* (Vol. 1).
- Moreno, H., Vélez, M., Montoya, J., & Rhenals, R. (2006). La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 59 - 69.
- Murcia Cañón, C. A., & Carvajal Perico, J. H. (2017). *PROCESOS DE INESTABILIDAD EN EL COSTADO SUR DEL CERRO DE LA POPA, PARTE ALTA DEL TALUD ADYACENTE AL CONVENTO DE LA ORDEN DE AGUSTINOS RECOLETOS, DISTRITO DE CARTAGENA DE INDIAS, DEPARTAMENTO DE BOLÍVAR*. Bogotá.
- OPS. (1997). *Estudio de caso: Vulnerabilidad de los sistemas de agua potable frente a deslizamientos*. Lima.
- Pacheco, Y. P., & Siachoque, A. (2012). *GEOLOGÍA DE COLOMBIA EVOLUCIÓN GEOLÓGICA SEGÚN LA SECCION 2.3, "SUR DE CARTAGENA*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Polanco, C. (2001). *Inventario y sistematización de los desastres naturales ocurridos en los municipios del departamento del valle del Aburrá, entre 1920-1999*. Universidad Eafit, Medellín.
- Ramos, A., Trujillo-Vela, M., & Prada, L. (2015). *Análisis descriptivos de procesos de remoción en masa en Bogotá*. Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá, Bogotá.



- Schosinsky N., G. (2007). *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*. Universidad de Costa Rica, Escuela Centroamericana de Geología, Costa Rica.
- Šilhán, K., Pánek, T., Turský, O., Brázdil, R., Klimeš, J., & Kašičková, L. (2014). Spatio-temporal patterns of recurrent slope instabilities affecting undercut slopes in flysch: A dendrogeomorphic approach using broad-leaved trees. *Geomorphology*, 240–254.
- Suárez Díaz. (2009). *Deslizamiento: análisis geotécnico*. Bucaramanga.
- Suárez Díaz, J. (1998). *Deslizamiento y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Ingeniería de Suelos Ltda.
- Suárez, J. (2001). *Control de Erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga: Instituto de investigaciones sobre erosión y deslizamiento.
- Teixeira Guerra, A. J., Fullen, M. A., Oliveira Jorge, M., Rodrigues Bezerra, J. F., & Shokr, M. S. (2017). Slope Processes, Mass Movement and Soil Erosion: A Review. *Pedosphere*, 27-41.
- Tiziano Perea, L. E. (2005). Componente vertical de registros sísmicos en México y su efecto en la respuesta sísmica no lineal de edificios. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 20 - 42.
- Torres, N., Angelone, A., & Garibay, M. (2010). *Geología y Geotecnia. tema: filtraciones*. Universidad Nacional de Rosario. . Bogotá: Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura .
- Universidad de Cartagena. (2009). *EVALUACIÓN GEOTECNICA Y DISEÑOS DE OBRAS DE ESTABILIZACIÓN EN TRES SITIOS CRÍTICOS DEL CERRO DE LA POPA, CASCO URBANO DE CARTAGENA*. Cartagena de Indias: ALCALDIA MAYOR DE CARTAGENA CONVENIO No. 09- 430- 431.
- Universidad de Cartagena. (2017). *ESTUDIOS DE ESTABILIDAD DE LADERAS Y DISEÑOS DE OBRAS DE MITIGACIÓN PARA EL SECTOR DEL SALTO DEL CABRÓN DEL CERRO DE LA POPA*. Cartagena.
- Universidad de Cartagena. (2017). *ESTUDIOS DE ESTABILIDAD DE LADERAS Y DISEÑOS DE OBRAS DE MITIGACIÓN PARA EL SECTOR DEL SALTO DEL CABRÓN DEL CERRO DE LA POPA*. Cartagena: Alcaldía mayor de Cartagena.
- Valverde, E. (2010). *Análisis de la influencia de la precipitación en el esfuerzo de succión y la estabilidad de un talud*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería en Construcción, San José.
- Van Genuchten, M. (1980). A closed form equation for predicting conductivity of unsaturated sols. *Soils Sci Soc Am J*, 892 - 898.

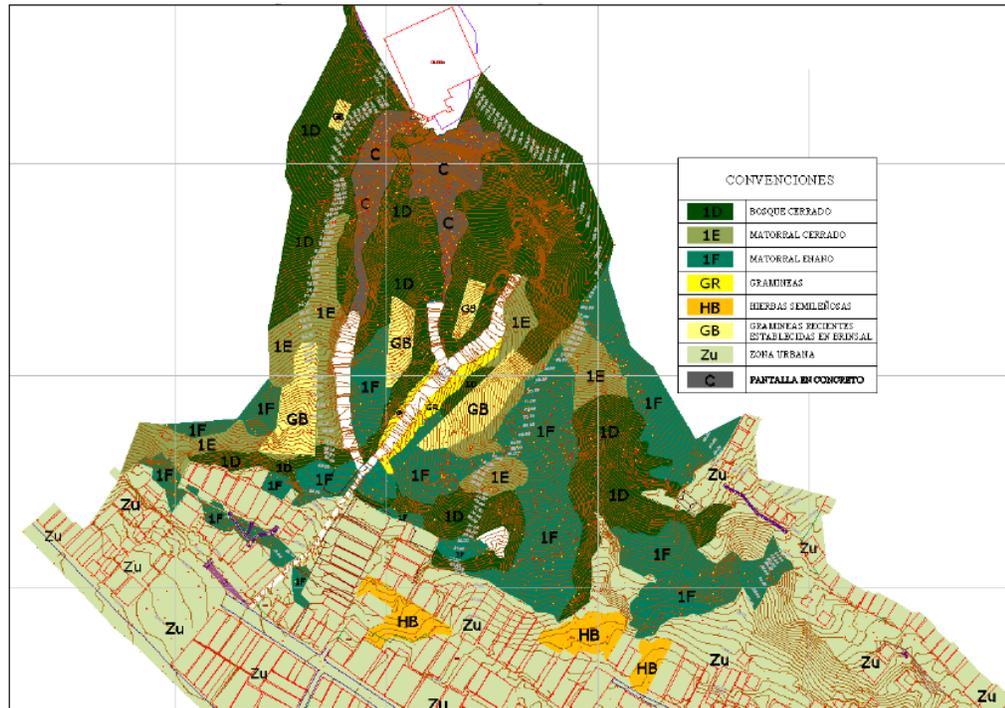


ANEXOS

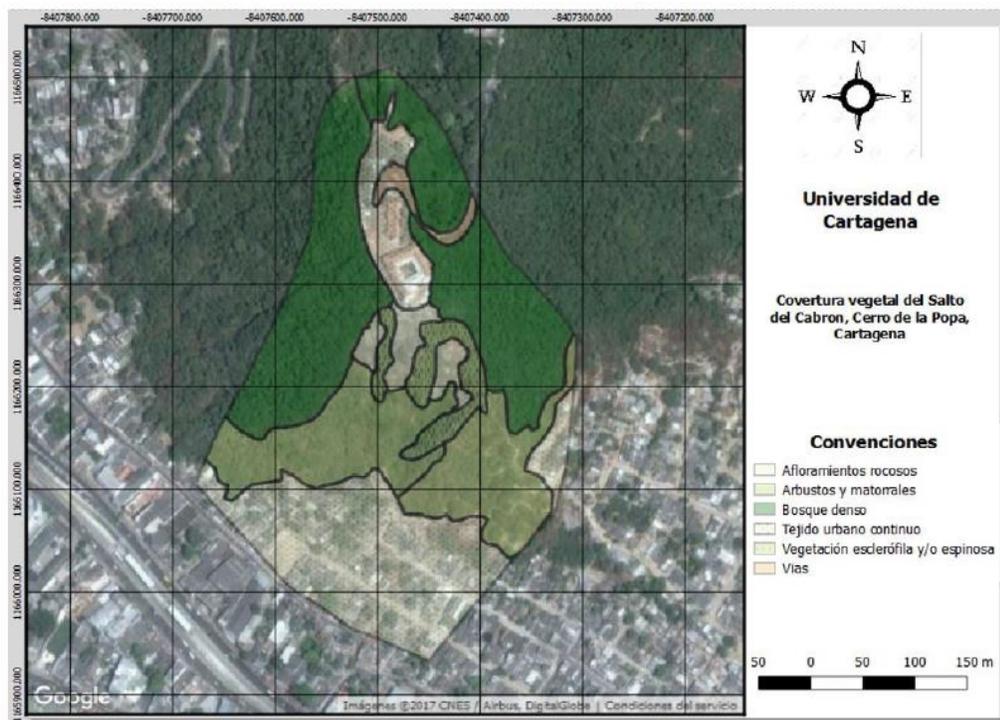
TÍTULO	AÑO	MES	LUGAR
Con el agua al “cuello”	2010	6	Estribaciones del Cerro de la Popa
Sigue tragedia invernal en faldas del Cerro de La Popa	2010	7	Faldas del Cerro La Popa
Los pasos de un aguacero letal	2010	7	El Pesebre
Reubican a familias damnificadas	2010	7	Faldas de la Popa
Distrito prosigue despeje de vías obstruidas con desechos arrastrados por las lluvias	2010	7	Cerro La Popa
Ocho viviendas semidestruidas	2010	9	Faldas de la Popa
La Paz, sin tranquilidad	2010	9	Barrio La Paz (Faldas de la Popa)
Lluvia, protesta y deslizamientos	2010	10	Barrios Torices, La Esperanza y Pie de la Popa
Tres viviendas dañadas por deslizamientos de tierra	2010	11	Faldas del Cerro La Popa, barrio Nuevo Bosque, Loma del Diablo
Casas de Pablo VI 1, en alto riesgo por los deslizamientos	2010	11	Pablo VI
Demolerán más de 50 casas afectadas por deslizamientos	2010	11	Manzanares, Altos del Nuevo Bosque, Nariño y Lo Amador.
Deslizamientos destruyen parcialmente 44 viviendas	2010	11	Estribaciones del cerro de la Popa y Loma del Marión
Emergencia invernal: piedra gigantesca derrumba casa	2010	11	Subida al Convento de los Agustinos Recoletos

Anexo 1. Eventos de deslizamiento en el Cerro de La Popa en el año 2010.

Fuente: EL UNIVERSAL 2010.

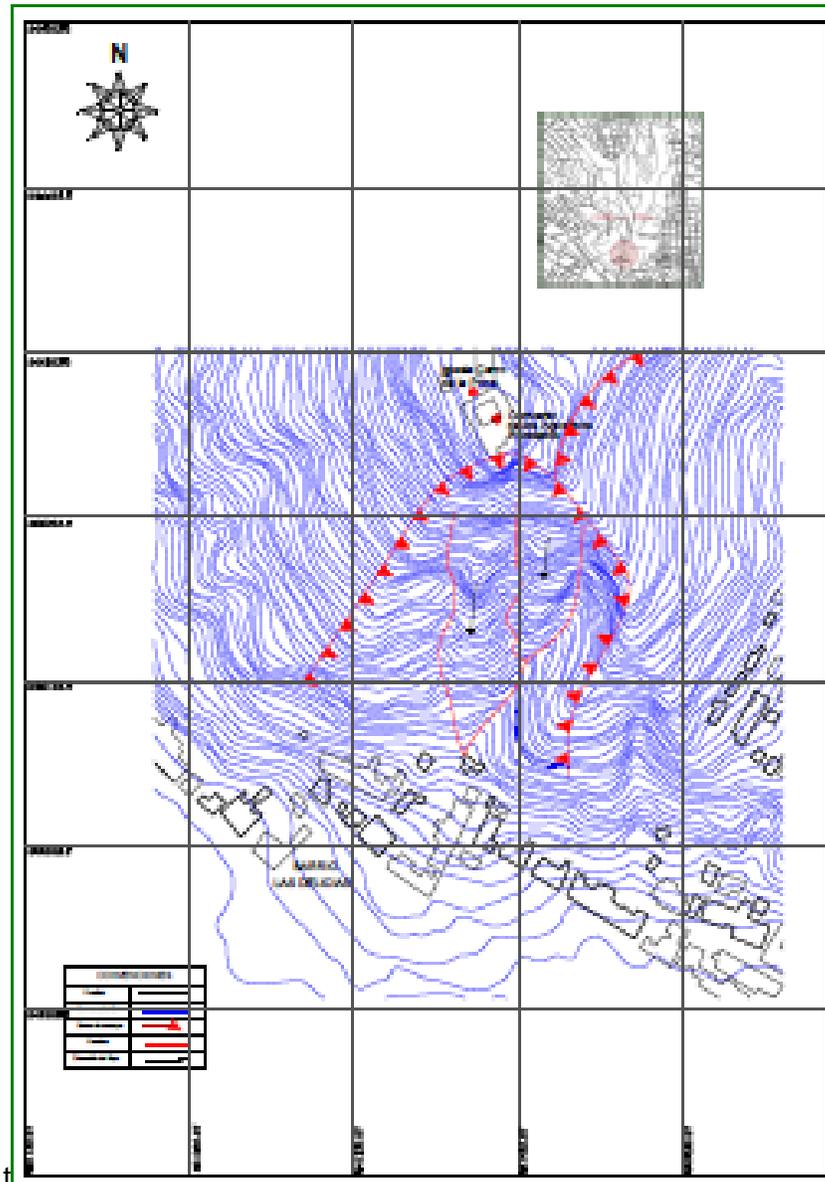


Anexo 2. Plano de Cobertura vegetal del Salto del Cabrón. Fuente: (Universidad de Cartagena, 2009).

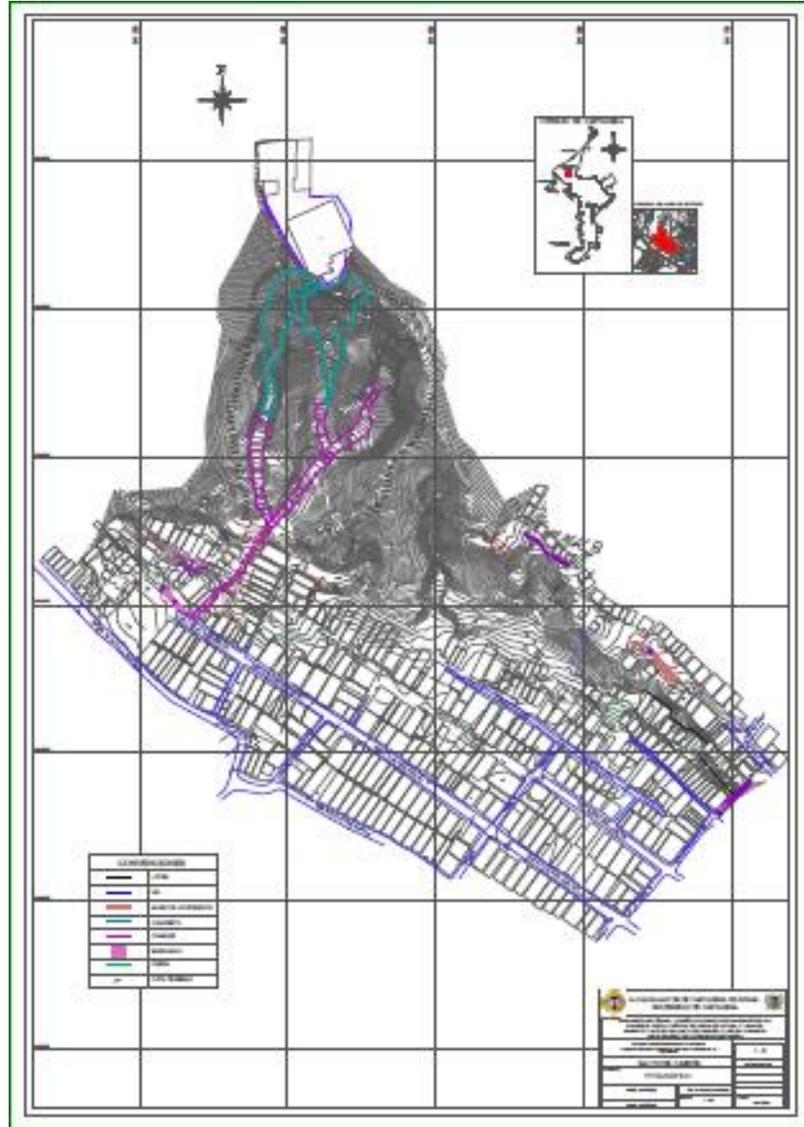




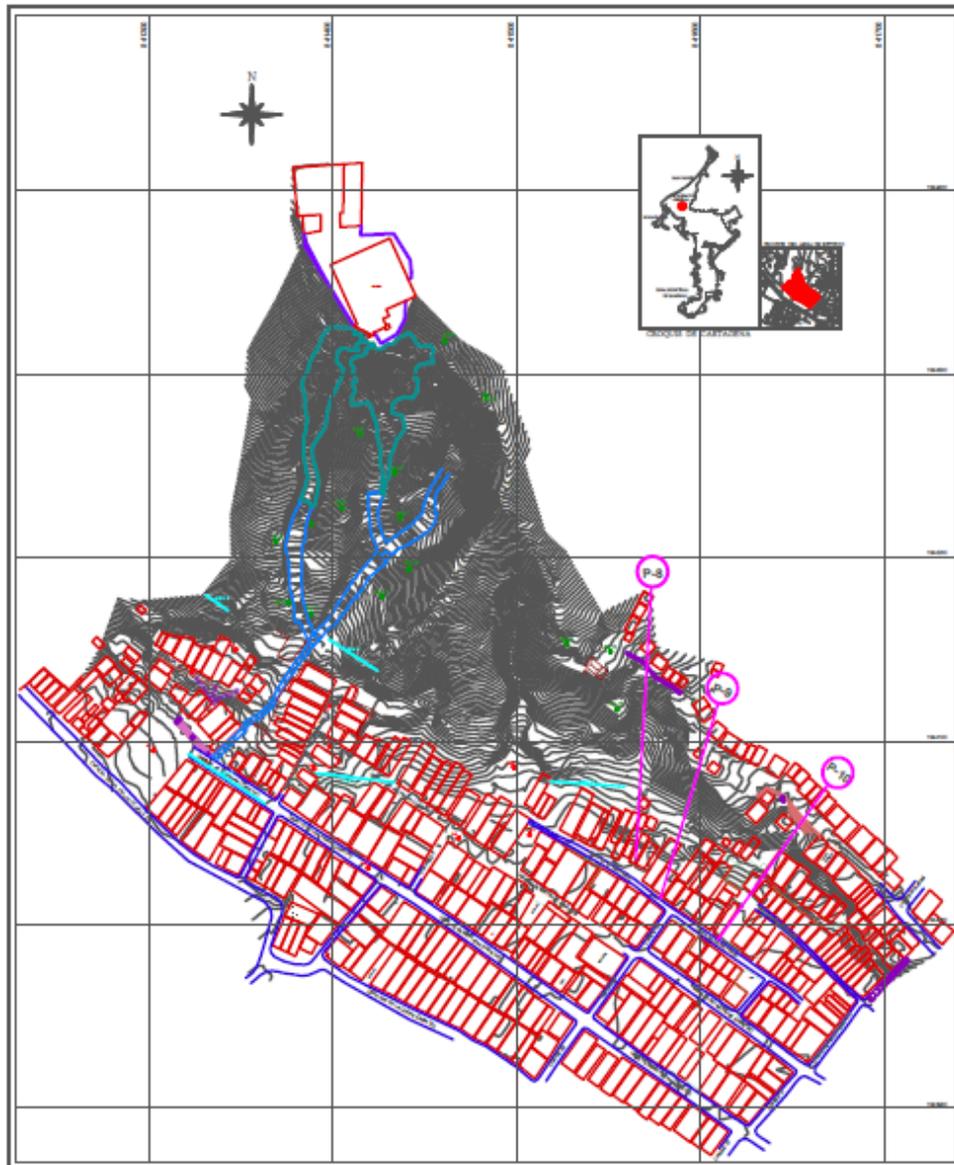
Anexo 3. Plano de Cobertura vegetal del Salto del Cabrón. Fuente: (Universidad de Cartagena, 2017).



Anexo 4. Plano de topografía general del Salto del Cabrón.



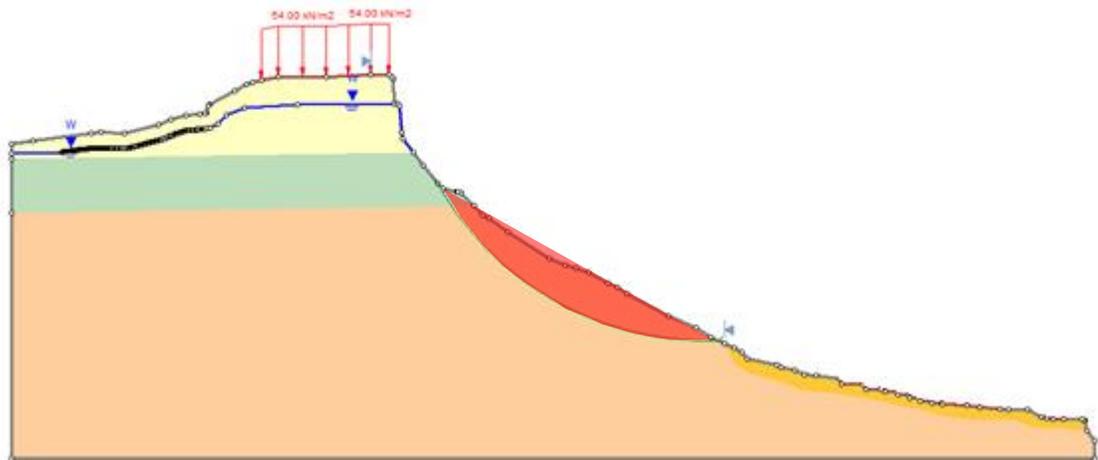
Anexo 5. Plano de topografía general del Salto del Cabrón.
Fuente: (Universidad de Cartagena, 2009).



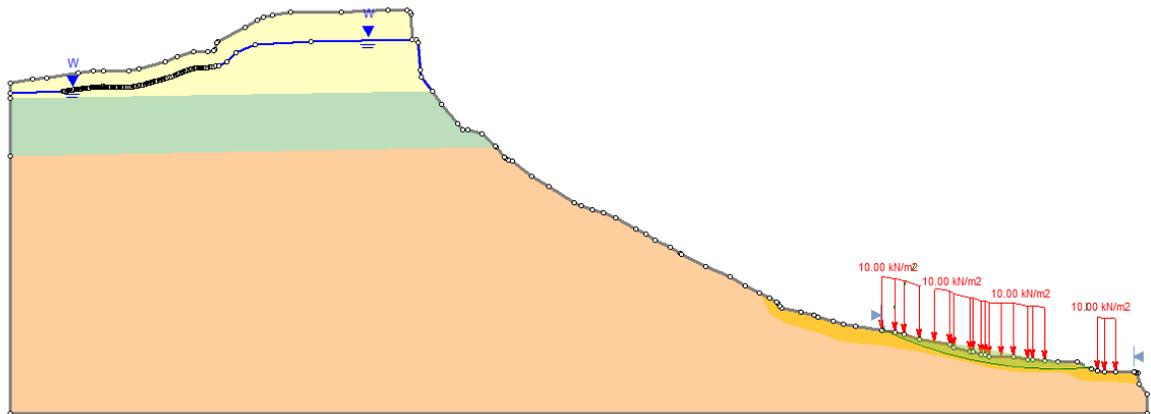
*Anexo 7. Localización de los perfiles de referencia en la topografía del año 2009.
Fuente: (Universidad de Cartagena, 2009).*

PERFIL	ANÁLISIS ESTÁTICO F.S.	ANÁLISIS DINÁMICO F.S.	CONDICIÓN
P-8	2.78	2.58	Estable
P-9	2.78	2.57	Estable
P-10	5.74	4.94	Estable

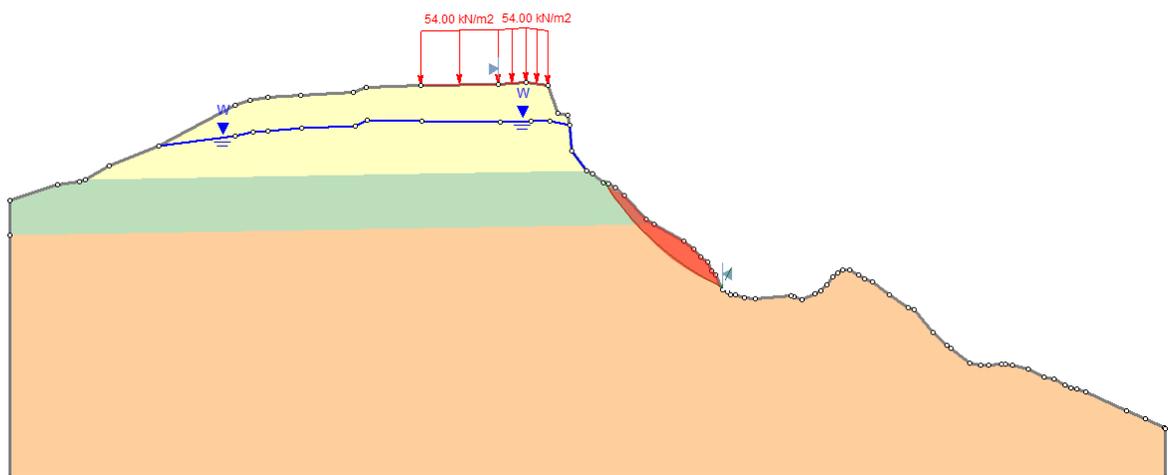
*Anexo 8. Factores de seguridad de los perfiles de referencia en la topografía del año 2009.
Fuente: (Universidad de Cartagena, 2009).*



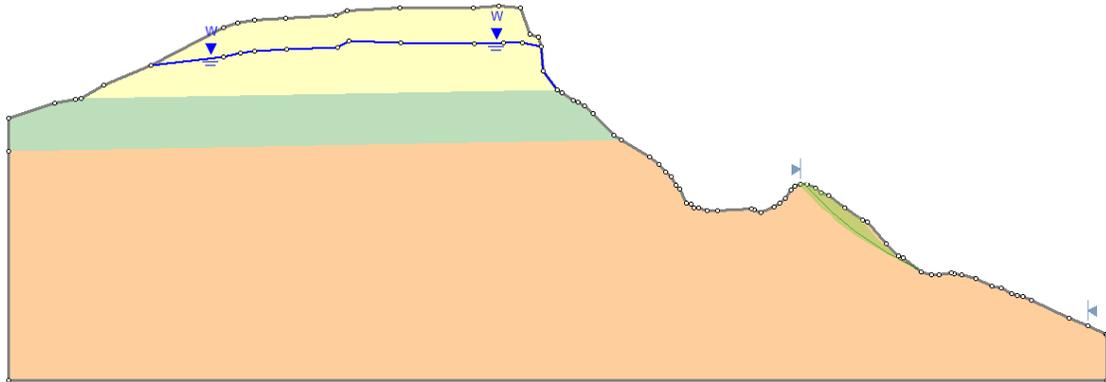
Anexo 9. Superficie de falla en la parte media del perfil 1.



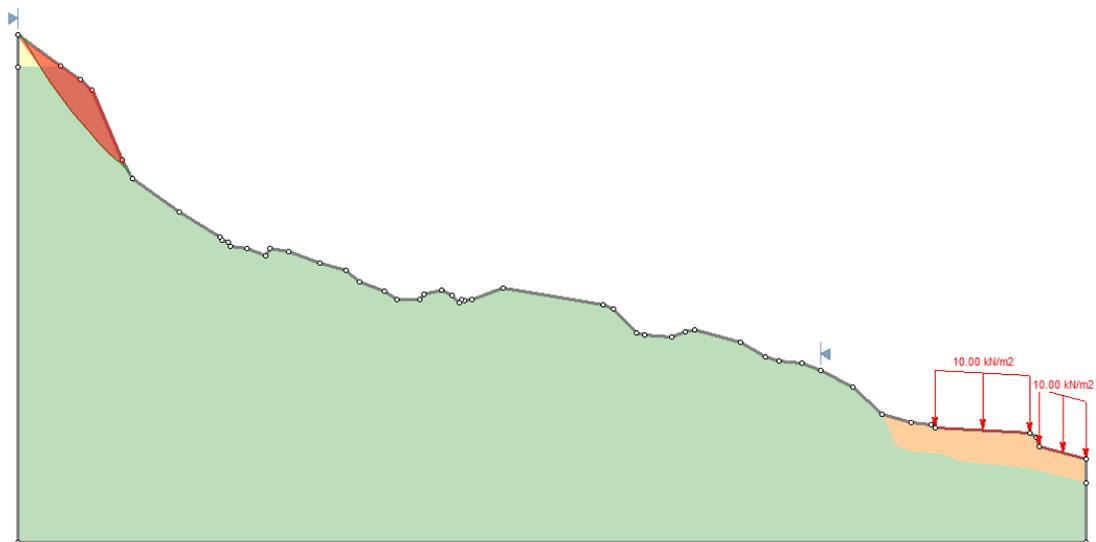
Anexo 10. Superficie de falla en la parte baja del perfil 1.



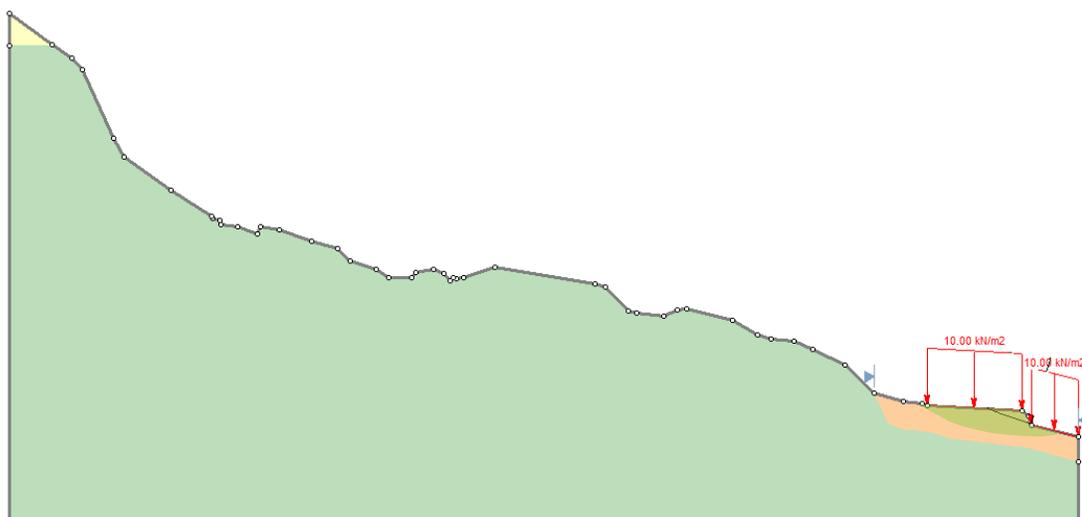
Anexo 11. Superficie de falla en la parte media del perfil 2.



Anexo 12. Superficie de falla en la parte baja del perfil 2.



Anexo 13. Superficie de falla en la parte alta del perfil 3.



Anexo 14. Superficie de falla en la parte baja del perfil 3.



Ciudad	A_a	A_v	Zona de Amenaza Sísmica
Arauca	0.15	0.15	Intermedia
Armenia	0.25	0.25	Alta
Barranquilla	0.10	0.10	Baja
Bogotá D. C.	0.15	0.20	Intermedia
Bucaramanga	0.25	0.25	Alta
Cali	0.25	0.25	Alta
Cartagena	0.10	0.10	Baja
Cúcuta	0.35	0.30	Alta
Florencia	0.20	0.15	Intermedia
Ibagué	0.20	0.20	Intermedia
Leticia	0.05	0.05	Baja
Manizales	0.25	0.25	Alta
Medellín	0.15	0.20	Intermedia
Mitú	0.05	0.05	Baja
Mocoa	0.30	0.25	Alta
Montería	0.10	0.15	Intermedia
Neiva	0.25	0.25	Alta
Pasto	0.25	0.25	Alta
Pereira	0.25	0.25	Alta
Popayán	0.25	0.20	Alta
Puerto Carreño	0.05	0.05	Baja
Puerto Inírida	0.05	0.05	Baja
Quibdó	0.35	0.35	Alta
Riohacha	0.10	0.15	Intermedia
San Andrés, Isla	0.10	0.10	Baja
Santa Marta	0.15	0.10	Intermedia
San José del Guaviare	0.05	0.05	Baja
Sincelejo	0.10	0.15	Intermedia
Tunja	0.20	0.20	Intermedia
Valledupar	0.10	0.10	Baja
Villavicencio	0.35	0.30	Alta
Yopal	0.30	0.20	Alta

Anexo 15. Tabla A.2.3-2, valor de A_a y de A_v para las ciudades capitales de departamento.

Fuente: NSR-10.



SONDEO	ZONA	COTA (m)	PROF(m)	# DE GOLPES CORREGIDO	W(%)	PESO ESPECÍFICO HÚMEDO (Ton/m3)	PESO ESPECÍFICO SECO (Ton/m3)	CORTE DIRECTO		COMPRESIÓN SIMPLE Cu (Kg/cm2)	DESCRIPCIÓN	
								ø (grados)	C(Kg/cm2)			
Pozo 1	Depositos recientes de deslizamientos; arcillolitas con niveles limosos	16,5	1,0-2,0	-	13,3	1,96	1,75			1,25	ML: LIMO PARDO, de baja plasticidad.	
			6,0-7,0	-	14,6	1,94	1,69				CL: ARCILLA ARENOSA PARDA, de media plasticidad	
			7,0-12,0	-							SM: ARENA LIMOSA GRIS OSCURA CON GRAVA	
			14-15	-	23,7	1,99	1,61	4	1,63		CL: ARCILLA GRIS DE MEDIA PLASTICIDAD	
			18-19	-	23,6	2,03	1,64	10	0,92			
			20-23	-	13,9							
			SPT5	Arcillolitas con niveles limosos	27	1-1,5			1,93	1,67		
1,5	7	15,9				1,97	1,65			0,55		
2	9	19,5				1,97	1,65			0,55		
2,5												Arcilla arenosa amarillenta, de baja plasticidad.
3	10	8,9				1,99	1,83					
3,5												Limo arenoso amarillento, de baja plasticidad.
4	9	15,4				1,97	1,71					
5	29	9,5				2,16	1,97	25	0,88			
5,5	27											Limo pardo de baja plasticidad.
6	33											
6,5	33					2,21	1,76	24	1,19	2,38		
7	39	25				2,21	1,76	24	1,19	2,38		
8	60	22,8	2,28	1,85				3,66				

Anexo 16. Resumen características geotécnicas del perfil 1.



Fuente: tomado de (Universidad de Cartagena, 2009) y (Universidad de Cartagena, 2017) y modificado por los autores.

SONDEO	ZONA	COTA (m)	PROF(m)	# DE GOLPES CORREGIDO	W(%)	PESO ESPECÍFICO HÚMEDO (Ton/m3)	PESO ESPECÍFICO SECO (Ton/m3)	CORTE DIRECTO		COMPRESIÓN SIMPLE Cu (Kg/cm2)	DESCRIPCIÓN
								ϕ (grados)	C(Kg/cm2)		
SM4	Arcillolitas con niveles limosos	33	2			2,11	1,92				CH: ARCILLA PARDA CLARA
			2,5	15		2,11	1,92				
			3	22	9,9	2,11	1,92				
			3,5	26		2,18	1,92			2,07	
			4	34	13,7	2,18	1,92			2,07	
			4,5	41	13,9	2,21	1,94				CL: Arcilla arenosa parda clara de media plasticidad
			5	19	10,7	2,09	1,89	23	0,58	1,16	
			5,5	19		1,94	1,54			2,09	
			6	21		1,94	1,54			2,09	CH: ARCILLA PARDA CLARA, de alta plasticidad
			6,5	41		1,94	1,54			2,09	
7	48	26,3	1,94	1,54			2,09				
SM10	Arcillolitas con niveles limosos	47	0,1-1,5								CL: ARCILLA ARENOSA PARDA CLARA
			1,5	6		2,09	2,02				
			2	19	3,6	2,09	2,02				
			3	30	7,6	2,15	2			1,65	Zahorra fina parda clara
			4	27	14,3	2,15	1,88	23	0,82	1,65	CL: ARCILLA ARENOSA PARDA CLARA
			5	27							

Anexo 17. Continuación resumen características geotécnicas del perfil 1.

Fuente: tomado de (Universidad de Cartagena, 2009) y (Universidad de Cartagena, 2017) y modificado por los autores.



SONDEO	ZONA	COTA (m)	PROF(m)	# DE GOLPES CORREGIDO	W(%)	PESO ESPECÍFICO HÚMEDO (Ton/m3)	PESO ESPECÍFICO SECO (Ton/m3)	CORTE DIRECTO		COMPRESIÓN SIMPLE Cu (Kg/cm2)	DESCRIPCIÓN			
								φ (grados)	C(Kg/cm2)					
SM12	Arcillolitas con niveles limosos	65	1	26		2,16	1,88			1,83	CL: Arcilla arenosa parda clara de media plasticidad			
			1,5	30	14,9	2,16	1,88							
			2	31										
						2,5	31		2,17	1,83		1,95	CL: Arcilla Gravosa Parda clara de media plasticidad	
						3	32		2,17	1,83				
						3,5	33	18,6	2,17	1,83				
						4	30							
						4,5	32		2,17	1,75	0,95	25	1,89	CL: Arcilla parda clara, de media plasticidad con arena
						5	31	23,8	2,17	1,75				
POZO3	Caliza Coralina	151	0,5								Piedra Caliza Coralina			
			8,5			1,93								
			10											
			11			2,17								
			12,5											
			13			2,07								

Anexo 18. Continuación resumen características geotécnicas del perfil 1.

Fuente: tomado de (Universidad de Cartagena, 2009) y (Universidad de Cartagena, 2017) y modificado por los autores.



SONDEO	ZONA	COTA (m)	PROF(m)	# DE GOLPES CORREGIDO	W(%)	PESO ESPECÍFICO HÚMEDO (Ton/m3)	PESO ESPECÍFICO SECO (Ton/m3)	CORTE DIRECTO		COMPRESIÓN SIMPLE Cu (Kg/cm2)	DESCRIPCIÓN	
								ø(grados)	C(Kg/cm2)			
SM19	Arcillolitas con niveles limosos	63	1,5	16	6,4	2,08	1,91				ML: LIMO AMARILLENTO de baja plasticidad	
			2	18	9	2,08	1,91					
			2,5			2,10	1,96			1,22		
			3	20	7,3	2,10	1,96				1,22	CL: ARCILLA AMARILLENTA de media plasticidad
			4	22								
			5	22								
SM-18	Arcillolitas con niveles limosos	63	2	15		2,05	1,73			0,915	CL: Arcilla Amarillenta de media plasticidad	
			3	22	18,8	2,12	1,78			1,403		
			4	27		2,15	1,74	15	0,854	1,708		
			5	28	23,7	2,15	1,74	15	0,854	1,708		
SM-11	Arcillolitas con niveles limosos	61	1,5	4	14,2	1,73	1,44				CL: ARCILLA GRAVOSA PARDA CLARA DE MEDIA PLASTICIDAD	
			2	2	20,2	1,73	1,44					
			3	25	15,3	2,14	1,85			1,525		
			3,5	27								
			4,5	25		2,15	1,80				1,647	CL: ARCILLA PARDA CLARA DE BAJA PLASTICIDAD
			5	27	19,6	2,15	1,80	23	0,8235	1,647		

Anexo 19. Resumen características geotécnicas del perfil 2.

Fuente: tomado de (Universidad de Cartagena, 2009) y (Universidad de Cartagena, 2017) y modificado por los autores.



SONDEO	ZONA	COTA (m)	PROF(m)	# DE GOLPES CORREGIDO	W(%)	PESO ESPECÍFICO HÚMEDO (Ton/m3)	PESO ESPECÍFICO SECO (Ton/m3)	CORTE DIRECTO		COMPRESIÓN SIMPLE Cu (Kg/cm2)	DESCRIPCIÓN	
								ø(grados)	C(Kg/cm2)			
SM-7	Limos arenosos Calcareos	103	1,5	5							ML: Limo pardo claro de baja plasticidad	
			2	7	8,4	1,93	1,78					
			3	12	24,8	2,02	1,62			0,732		
			3,5	16								CL: Arcilla parda clara de media plasticidad
			4	19	18,5	2,13	1,80	15	0,85			
			5	24								
POZO3	Caliza Coralina	151	0,5								Piedra Caliza Coralina	
			8,5			1,93						
			10									
			11			2,17						
			12,5									
			13			2,07						

Anexo 20. Continuación resumen características geotécnicas del perfil 2.

Fuente: tomado de (Universidad de Cartagena, 2009) y (Universidad de Cartagena, 2017) y modificado por los autores.



SONDEO	ZONA	COTA (m)	PROF(m)	# DE GOLPES CORREGIDO	W(%)	PESO ESPECÍFICO HÚMEDO (Ton/m3)	PESO ESPECÍFICO SECO (Ton/m3)	CORTE DIRECTO		COMPRESIÓN SIMPLE Cu (Kg/cm2)	DESCRIPCIÓN
								ø(grados)	C(Kg/cm2)		
SM9	Arcillolitas con niveles limosos	45	2,5	21	7,9	1,88	1,74			1,281	Grava arcillosa con arena parda clara.
			3	21		1,88	1,74			1,281	
			3,5	17	17,2	2,07	1,77	22	0,52	1,037	Arcilla parda clara, de media plasticidad con arena.
			4	17		2,07	1,77	22	0,52	1,037	
SM10	Arcillolitas con niveles limosos	47	0,1-1,5								CL: ARCILLA ARENOSA PARDA CLARA
			1,5	6		2,09	2,02				
			2	19	3,6	2,09	2,02				
			3	30	7,6	2,15	2			1,65	Zahorra fina parda clara
			4	27	14,3	2,15	1,88	23	0,82	1,65	CL: ARCILLA ARENOSA PARDA CLARA
			5	27							
SM12	Arcillolitas con niveles limosos	65	1	26		2,16	1,88			1,83	CL: Arcilla arenosa parda clara de media plasticidad
			1,5	30	14,9	2,16	1,88				
			2	31							
			2,5	31		2,17	1,83			1,95	CL: Arcilla Gravosa Parda clara de media plasticidad
			3	32		2,17	1,83				
			3,5	33	18,6	2,17	1,83				
			4	30							
			4,5	32		2,17	1,75	0,95	25	1,89	CL: Arcilla parda clara, de media plasticidad con arena
5	31	23,8	2,17	1,75							

Anexo 21. Resumen características geotécnicas del perfil 3.

Fuente: tomado de (Universidad de Cartagena, 2009) y (Universidad de Cartagena, 2017) y modificado por los autores.



SONDEO	ZONA	COTA (m)	PROF(m)	# DE GOLPES CORREGIDO	W(%)	PESO ESPECÍFICO HÚMEDO (Ton/m3)	PESO ESPECÍFICO SECO (Ton/m3)	CORTE DIRECTO		COMPRESIÓN SIMPLE Cu (Kg/cm2)	DESCRIPCIÓN	
								ø(grados)	C(Kg/cm2)			
SM11	Arcillolitas con niveles limosos	61	1,5	4	14,2	1,73	1,44				CL: ARCILLA GRAVOSA PARDA CLARA DE MEDIA PLASTICIDAD	
			2	2	20,2	1,73	1,44					
			3	25	15,3	2,14	1,85			1,53		
			3,5	27								CL: ARCILLA PARDA CLARA DE BAJA
			4,5	25		2,15	1,80			1,65		
			5	27	19,6	2,15	1,80	23	0,8235	1,65		
SM7	Limos arenosos Calcareos	103	1,5	5							ML: Limo pardo claro de baja plasticidad	
			2	7	8,4	1,93	1,78					
			3	12	24,8	2,02	1,62			0,732		
			3,5	16								CL: Arcilla parda clara de media plasticidad
			4	19	18,5	2,13	1,80	15	0,85			
5	24											

Anexo 22. Continuación resumen características geotécnicas del perfil 3.

Fuente: tomado de (Universidad de Cartagena, 2009) y (Universidad de Cartagena, 2017) y modificado por los autores.