

INFLUENCIA DE LAS LLUVIAS ANTECEDENTES EN LA ESTABILIDAD DE
TALUDES EN UN SUELO LATERÍTICO DE JAMUNDÍ (VALLE DEL CAUCA)

Estudiante:

Diego Fernando Diaz Chilito

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO CIVIL

Universidad del valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Santiago de Cali, Colombia
año 2025

INFLUENCIA DE LAS LLUVIAS ANTECEDENTES EN LA ESTABILIDAD DE
TALUDES EN UN SUELO LATERÍTICO DE JAMUNDÍ (VALLE DEL CAUCA)

Estudiante:

Diego Fernando Diaz Chilito

Codirectoras:

Isabel Cristina Gómez Gutiérrez, PhD

Lina María Ospina Ostios, PhD

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO CIVIL

Universidad del valle

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil y Geomática

Santiago de Cali, Colombia

año 2025

Nota de aceptación

Carlos Alberto Madera. Ph.D
Director de pregrado Ingeniería civil
Universidad del valle

Firma de evaluador 1

Firma de evaluador 1

Isabel Cristina Gómez Gutiérrez, PhD
Codirectora
Universidad del valle

Lina María Ospina Ostios, PhD
Codirectora
Universidad del valle

Agradecimientos

Quiero expresar mis sinceros agradecimientos a todas las personas que intervinieron en este proceso de formación.

A mi familia y amigos, por su amor y fraternidad que me han llenado de fortaleza en momentos difíciles, compañeros de estudio quienes compartieron retos y alegrías he hicieron este camino mucho más llevadero y significativo.

Mi gratitud a mis directoras, Isabel Cristina Gómez Gutiérrez, Ph.D. y Lina María Ospina Ostios, Ph.D. por su orientación, dedicación y apoyo en este largo y bello proceso. Todas sus enseñanzas fueron vitales para el desarrollo mi etapa académica final. Al profesor Carlos Alberto Manrique Londoño por sus aportes y enseñanzas en el laboratorio. Al programa de ingeniería Civil de la Universidad del Valle por brindarme las herramientas académicas y un entorno propicio para mi formación profesional. A la parcelación colinas de Miravalle ubicada en Jamundí (Valle del Cauca). A ICC ingeniería consultoría y capacitación por su colaboración mediante la disposición de demostraciones del software GeoStudio,

Cada uno de ustedes ha dejado una huella en mi proceso académico y en mi vida. A todos muchas gracias por ser parte de este logro.

Resumen

Este proyecto se realizó para analizar la influencia de las lluvias antecedentes en la estabilidad de taludes en un suelo laterítico de Jamundí (Valle del Cauca). Los datos recopilados de las lluvias antecedentes pertenecen a la estación San Vicente y está ubicada cerca de un movimiento en masa en el sector de Miravalle en Jamundí. Este movimiento en masa fue usado como referencia.

Se identificaron algunas propiedades geomecánicas del suelo en la zona con ayuda de información preliminar y algunos ensayos de laboratorio como los límites de consistencia, corte directo, humedad natural. Esta recopilación de información se desarrolló con el fin tener datos en rangos aceptables que comprobaran la existencia de este tipo de suelo en la zona. Se recopiló información sobre el comportamiento de las curvas características y la función permeabilidad del suelo. Posteriormente se conformaron los patrones de lluvia denominados Avanzado, normal y retardado. Las precipitaciones usadas fueron de 312 mm, 624mm y 1248 mm de acuerdo con antecedentes e información bibliográfica. Finalmente, con la información recopilada se establecieron las condiciones iniciales en programas de elementos finitos. Para las redes de flujo se usó el programa seep/w el cual incorpora las ecuaciones que rigen el movimiento del agua en el suelo como Darcy (1856) y ecuación de Richards (1931). Para el análisis de estabilidad se usó el software Slope® el cual incorpora las metodologías de análisis de estabilidad como por ejemplo Bishop (1955), el cual es recomendado por bibliografía (Das,2015).

En el análisis de estabilidad se observó cómo los patrones de lluvia influyen en la estabilidad de taludes en suelos lateríticos. Los patrones avanzados afectan mucho más la estabilidad en comparación con los patrones de lluvia retardado y normal. Igualmente se determinó que los patrones de lluvia avanzados luego de aplicados afectan mucho más la estabilidad en su proceso de recuperación en el tiempo, en comparación con los patrones de lluvia retardado y normal. Las presiones de poro influyen en este proceso, pues las variaciones para los patrones avanzados son mucho mayores con respecto a los patrones retardados y normales.

Palabras claves: Movimiento en masa, Lluvias antecedentes.

Tabla de Contenido

	Pág.
Lista de figuras.....	1
Lista de tablas	6
Introducción	8
1. Planteamiento del problema	9
1.1. Formulación del problema	12
1.2. Objetivos	12
1.2.1. Objetivo general	12
1.2.2. Objetivos específicos	13
1.3. Justificación	13
2. Marco de referencia.....	16
2.1. Marco teórico	16
2.1.1. Movimientos en masa	16
2.1.2. Suelos lateríticos.....	21
2.1.3. Succión matricial	25
2.1.4. Ley de Darcy	26
2.1.5. Conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad	26
2.1.6. Envolvente de resistencia para suelos parcialmente saturados.....	27
2.1.7. Factor de seguridad de un talud.....	28
2.1.8. Lluvias.....	29
2.1.9. Modelos numéricos.....	36
2.2. Antecedentes	38
3. Metodología.....	41
3.1. Tipo de estudio.....	41
3.2. Localización del talud de referencia de estudio y muestra de la laterita.	42
3.3. Fases del proyecto.	43
3.3.1. Fase 1: Recopilación de información en pluviómetros o pluviógrafos del área origen de la laterita.....	43

3.3.2.	Fase 2: Recopilación de información de parámetros Índice y Geomecánicas de la laterita.....	47
3.3.3.	Fase 3: Obtener la curva característica y función permeabilidad en los suelos lateríticos54	
3.3.4.	Fase 4: Elaboración de patrones de lluvia antecedente.....	57
3.3.5.	Fase 5: Elaboración de redes de flujo y análisis de la variación del factor de seguridad en función del tiempo, teniendo en cuenta los patrones de lluvia establecidos.	64
4.	Resultados y análisis de resultados	80
5.	Conclusiones y recomendaciones	94
6.	Referencias bibliográficas	96
7.	Anexos.....	100
7.1.	Datos Estación San Vicente.....	100
7.2.	Registro fotográfico.....	102
7.3.	Ensayos realizados.....	105

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Amenaza relativa por movimiento en masa para el departamento del Valle del Cauca. Fuente: SGC (2017).....	10
Figura 2. Porcentajes. Categorías de amenaza relativa por movimiento en masa para el departamento del Valle del Cauca. Fuente: SGC (2017)	11
Figura 3. Mayor número de movimientos en masa ocurridos en Colombia. Fuente: El espectador (2022).....	12
Figura 4. Distribución de los fallecidos reportadas por movimientos en masa, causados a nivel global por lluvias entre los años 2007 y 2017. Víctimas fatales con rangos de 1 a 5000. Fuente: NASA’s Scientific Visualization Studio (2018)	13
Figura 5. IDD y pérdidas en miles de millones de dólares por eventos catastróficos probables en 50 años para algunos países latinos. Fuente: BID (2010).....	14
Figura 6. Variación en el porcentaje de las precipitaciones promedio anual con respecto a 1850 – 1900. Fuente: IPCC (2021).....	15
Figura 7. Clasificación simplificada de diferentes tipos de movimientos en masa en función de los mecanismos de rotura y del tipo de material. Fuente: Vallejo et al. (2002)	17
Figura 8 Diferentes tipos de deslizamientos rotacionales. Fuente: Vallejo et al. (2002)....	18
Figura 9. Diferentes tipos de flujos. Fuente: Vallejo et al. (2002)	19
Figura 10. Distribución general de suelos lateríticos. Fuente: Gidigas y Tibasosa, (2018)	22
Figura 11. Zonas de la curva característica de un suelo. Fuente: Fresneda (2019)	23
Figura 12. Masa de suelo abcdea antes y después de falla. Fuente: Das (2015)	28
Figura 13. Esquema de circulación de agua en una ladera. Fuente: Vallejo et al. (2002) ..	30
Figura 14. Esquema Hietograma. Fuente: Apaza (2019).....	30
Figura 15. Hietogramas de patrones de lluvia retardado, normal y avanzado. Fuente: Rahimi et al (2011).....	31
Figura 16. Comportamiento de flujo en bloque A. Fuente: Das (2015)	35
Figura 17. Resultados de modelo a escala en laboratorio de Rulon 1895. Fuente: Geo-slope internacional Ltd (2012).....	37

Figura 18. Análisis de seep/w del modelo Rulon 1895. Fuente: Geo-slope internacional Ltd (2012).....	37
Figura 19. Variación del F.S. vs tiempo (h) suelo LC (Rahimi et al.,2011). Fuente: Rahimi et al. (2011).....	39
Figura 20. Talud de referencia de estudio Jamundí, (Valle del cauca). Fuente: Google Earth (2024).....	42
Figura 21. Previsualización de estación pluviométrica san Vicente (triángulo Verde circulo blanco) en la zona de estudio. Fuente: IDEAM (2025)	44
Figura 22. Ubicación de la estación pluviométrica San Vicente, cercana al movimiento en masa en el sector de Miravalle. Fuente: Google Maps (2024).....	45
Figura 23. Lluvias antecedentes 18 semanas antes de la reactivación de las grietas. Datos obtenidos de la estación pluviométrica San Vicente CVC, ubicada a 4.3 km del movimiento en masa. Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 24. Coordenadas corregidas estación San Vicente. Fuente: CVC (2023).....	46
Figura 25. Perfil estratigráfico de perforación deducido de la zona. Fuente: inestabilidad de talud vía interna- parcelación colinas de Miravalle (2011).....	48
Figura 26. Características geomecánicas del suelo zona de la corona del talud y pendiente del talud. Fuente: inestabilidad de talud vía interna- parcelación colinas de Miravalle (2011)	48
Figura 27. Registro fotográfico. Verificación de información en la parte alta del talud. Fuente: Diaz (2022)	49
Figura 28. Registro fotográfico. Recolección de muestra inalterada. Fuente: Diaz (2023).50	
Figura 29. Registro fotográfico. Preparación de muestras para la realización de los ensayos de humedad natural y límites de consistencia. Fuente: Diaz (2023)	51
Figura 30. Registro fotográfico. Izquierda. Preparación para Gradación. Derecha Realización Limites de consistencia. Fuente: Diaz (2023)	52
Figura 31. Registro fotográfico. Izquierda gradación suelo, Derecha Probetas para corte directo. Fuente: Diaz (2023).....	52
Figura 32. Patrones de lluvia elaborados, patrón retardado, avanzado y normal. Fuente: Elaboración propia.....	60

Figura 33. Patrones de lluvia elaborados para una intensidad de $3.61e-06 \frac{m^3}{s * m^2}$. Patrones de lluvia retardado, avanzado y normal respectivamente. Fuente: Elaboración propia	61
Figura 34. Patrones de lluvia elaborados para una intensidad de $7.22e-06 \frac{m^3}{s * m^2}$. Patrón retardado, avanzado y normal respectivamente. Fuente: Elaboración propia	62
Figura 35. Patrones de lluvia elaborados para una intensidad de $1.44e-05 \frac{m^3}{s * m^2}$. Patrón retardado, avanzado y normal respectivamente. Fuente: Elaboración propia	63
Figura 36. Modelo geométrico del talud a utilizar. Fuente: Elaboración propia.....	65
Figura 37. Curva característica del suelo laterítico utilizada Fredlund y Xing (1994). Fuente: Elaboración propia	65
Figura 38. Función permeabilidad del suelo laterítico a usar . Fuente: Elaboración propia.	66
Figura 39. Incorporación de condiciones de frontera para análisis de estabilidad. Fuente : Elaboración propia.....	67
Figura 40. Incorporación de datos, patrón de lluvia Avanzado 1248 mm . Fuente: Elaboración propia.....	68
Figura 41. Incorporación de datos, patrón de lluvia retardado 1248 mm. Fuente: Elaboración propia	68
Figura 42. Incorporación de datos, patrón de lluvia Normal 1248 mm. Fuente: Elaboración propia	69
Figura 43. Aplicación de patrón de lluvia avanzado al talud modelo. Fuente: Elaboración propia.....	69
Figura 44. Aplicación de patrón de lluvia normal al talud modelo. Fuente: Elaboración propia.....	70
Figura 45. Aplicación de patrón de lluvia retardado al talud modelo. Fuente: Elaboración propia	70
Figura 46. Aplicación de patrón de lluvia avanzado al Talud modelo 1248 mm . Filtración con línea de tiempo igual a 2 h. Fuente: Elaboración propia	71
Figura 47 Aplicación de patrón de lluvia normal al Talud modelo 1248 mm . Filtración con línea de tiempo igual a 2 h. Fuente: Elaboración propia.....	71

Figura 48. Aplicación de patrón de lluvia retardado al talud modelo 1248 mm. Filtración con línea de tiempo igual a 2 h. Fuente: Elaboración propia.....	72
Figura 49. Aplicación de patrón de lluvia avanzado al talud modelo 1248 mm. Filtración con línea de tiempo igual a 4 días. Fuente: Elaboración propia	73
Figura 50. Aplicación de patrón de lluvia normal al talud modelo 1248 mm. Filtración con línea de tiempo igual a 4 días. Fuente: Elaboración propia	73
Figura 51. Aplicación de patrón de lluvia retardado al talud modelo 1248 mm. Filtración Con línea de tiempo igual a 4 días. Fuente: Elaboración propia	74
Figura 52. Ingreso de datos relevantes para el análisis de estabilidad de talud. Fuente: Elaboración propia.	75
Figura 53. Método para análisis de estabilidad, método usado dovelas de Bishop (1955) , definición de grilla y dirección de movimiento de falla . Fuente: Elaboración propia.....	76
Figura 54. Modelo geométrico con malla definida para obtención de factor de seguridad con patrones de lluvia aplicados. Fuente: Elaboración propia.....	76
Figura 55. Factores y fallas críticas previas obtenidos en talud. Fuente: Elaboración propia.	77
Figura 56. Comportamiento del factor de seguridad en el talud con una lluvia aplicada de 1248 mm, patrón de lluvia avanzado, periodo de aplicación, 5 días. FS mínimo =1.457 a las 52 h. Fuente: Elaboración propia.	78
Figura 57. Comportamiento del factor de seguridad en el talud con una lluvia aplicada de 1248 mm, patrón de lluvia normal, periodo de aplicación, 5 días. FS mínimo =1.458 a las 96 h. Fuente: Elaboración propia.....	78
Figura 58. Comportamiento del factor de seguridad en el talud con una lluvia aplicada de 1248 mm, patrón de lluvia retardado, periodo de aplicación, 5 días. FS mínimo =1.459 a las 96 h. Fuente: Elaboración propia.	79
Figura 59. Resultados obtenidos para cada patrón de lluvia, cantidad de precipitación 1248 mm. Fuente: Elaboración propia.....	81
Figura 60. Resultados obtenidos para cada patrón de lluvia. Cantidad de precipitación 624 mm. Fuente: Elaboración propia.....	82
Figura 61. Resultados obtenidos para cada patrón de lluvia. Cantidad de precipitación 312 mm. Fuente: Elaboración propia.....	84

Figura 62. Pendiente de recuperación para el patrón avanzado, con precipitación de 312 mm, Fuente: elaboración propia	86
Figura 63. Comportamiento de la presión de poro vs elevación. Precipitación de 312mm en cinco días, patrón avanzado . Fuente: Elaboración propia	87
Figura 64. Comportamiento de la presión de poro vs elevación. Precipitación de 312mm en cinco días, patrón normal. Fuente: Elaboración propia	88
Figura 65. Comportamiento de la presión de poro vs elevación. Precipitación de 312mm en cinco días, patrón retardado. Fuente: Elaboración propia.....	88
Figura 66. Comportamiento de la presión de poro vs elevación. Precipitación de 624 mm en cinco días, patrón avanzado. Fuente: Elaboración propia.....	89
Figura 67. Comportamiento de la presión de poro vs elevación. Precipitación de 624 mm en cinco días, patrón normal. Fuente: Elaboración propia	90
Figura 68. Comportamiento de la presión de poro vs elevación. Precipitación de 624 mm en cinco días, patrón retardado. Fuente: Elaboración propia.....	90
Figura 69. Comportamiento de la presión de poro vs elevación. Precipitación de 1248 mm en cinco días, patrón avanzado. Fuente: Elaboración propia	91
Figura 70. Comportamiento de la presión de poro vs elevación. Precipitación de 1248 mm en cinco días, patrón normal. Fuente: Elaboración propia.....	92
Figura 71. Comportamiento de la presión de poro vs elevación. Precipitación de 1248 mm en cinco días, patrón retardado. Fuente: Elaboración propia	92

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Valores típicos del coeficiente de permeabilidad para suelos saturados. Fuente: Das (2015).....	27
Tabla 2. Umbrales de precipitaciones para desencadenamiento de movimientos en ladera. Fuente: Vallejo et al. (2002).....	32
Tabla 3. Relación entre precipitaciones y desencadenamiento de movimientos en ladera. Fuente: Vallejo et al. (2002).....	33
Tabla 4. Principales variables y constantes del estudio a considerar. Fuente: Elaboración propia	41
Tabla 5. Superficie y densidad de población, Municipio de Jamundí, (Valle del cauca). Fuente: PBOT página Web (2017)	43
Tabla 6. Normativa existente utilizada para realización de ensayos de laboratorio. Fuente: Elaboración propia.....	51
Tabla 7. Datos obtenidos en laboratorio y de fuentes bibliográficas. Fuente: Elaboración propia.....	53
Tabla 8. Principales parámetros relacionados con ecuaciones de succión, Brooks y Corey(1966). Fuente: Yasuma bello et al. (2019)	55
Tabla 9. Principales parámetros relacionados con ecuaciones de succión, Van Genuchten (1966). Fuente: Yasuma bello et al. (2019).....	55
Tabla 10. Principales parámetros relacionados con ecuaciones de succión, Fredlund y Xing (1994), Fuente: Yasuma bello et al. (2019).....	56
Tabla 11. Cantidad en mm correspondientes a las lluvias un mes antes de la reactivación de grietas en el sitio, (zona azul). Fuente: Elaboración propia	58
Tabla 12. Cantidad en mm correspondientes a las lluvias 15 días antes de la reactivación de grietas, 312 mm. Fuente: Elaboración propia.....	59
Tabla 13. Distribución de 312 mm en 5 días. Patrones de lluvia retardado, avanzado, normal. Fuente: Elaboración propia	60
Tabla 14. Distribución de 312 mm equivalentes a $3.61 \cdot 10^6 \frac{m^3}{s \cdot m^2}$ en cinco días. Patrones de lluvia retardado, avanzado, normal. Fuente: Elaboración propia	61

Tabla 15. Distribución de 624 mm equivalentes a $7.22E-06 \frac{m^3}{s * m^2}$ en 5 días. Patrones de lluvia retardado, avanzado, normal. Fuente: Elaboración propia.....	62
Tabla 16. Distribución de 1248 mm equivalentes a $1.44E-05 \frac{m^3}{s * m^2}$ en 5 días. Patrones de lluvia retardado, avanzado y normal respectivamente. Fuente: Elaboración propia	63
Tabla 17. Información obtenida del comportamiento del FS para los patrones de lluvia avanzado, normal y retardado, conformados con una lluvia igual a 1248 mm. Fuente: Elaboración propia.	80
Tabla 18. Información obtenida del comportamiento del FS para los patrones de lluvia avanzado, normal y retardado, conformados con una lluvia igual a 624 mm. Fuente: Elaboración propia.	82
Tabla 19. Información obtenida del comportamiento del FS para los patrones de lluvia avanzado, normal y retardado, conformados con una lluvia igual a 312 mm. Fuente: Elaboración propia.	83
Tabla 20. Valores del FS mínimo obtenidos en el tiempo para cada patrón de lluvia y sus cantidades en mm. Fuente: elaboración propia.	84
Tabla 21. Valores de las pendientes de recuperación de la estabilidad del talud, luego de la aplicación de los patrones de lluvias durante cinco días. Fuente: elaboración propia.....	86

Introducción

La estabilidad de taludes en las zonas tropicales ha tomado relevancia debido al Cambio Climático. Desde la época de los años 80 las intensidades de las lluvias y las sequías han aumentado considerablemente. Las lluvias afectan la estabilidad de los taludes, siendo más evidente en regiones con alta frecuencia de precipitaciones.

La zona Andina se encuentra ubicada entre los trópicos de Cáncer y Capricornio, aquí se encuentra ubicado el Departamento del Valle del Cauca y entre ellos el municipio de Jamundí. Según el Servicio Geológico Colombiano SGC (2017), el Valle del Cauca es considerada una zona de amenaza relativa alta. Las lluvias intensas son un factor desencadenante y ocasionan movimientos en masa que muy frecuentemente causan daños y dejan en muchos casos víctimas fatales y heridos.

La zona de referencia para el estudio está ubicada en el municipio de Jamundí. Se recopiló información importante de lluvias y características geomecánicas del suelo. Finalmente, mediante el análisis de redes de flujo y estabilidad se determinó la influencia de las lluvias antecedentes en la estabilidad de taludes en un suelo laterítico de Jamundí, Valle del Cauca

El documento está constituido por cinco capítulos centrales. El primer capítulo está conformado por el planteamiento del problema, justificación y se plantean los objetivos que dan solución al problema. En el segundo capítulo se presenta el marco de referencia, las teorías y conceptos de diferentes autores relacionados con el tema de investigación. El tercer capítulo está compuesto por la metodología y explica el paso a paso para lograr los objetivos propuestos mediante cinco fases de desarrollo. En el cuarto capítulo se realiza el análisis de resultados, aquí se pueden encontrar los cálculos, tablas y gráficos para la interpretación de resultados. El quinto capítulo presenta las conclusiones y recomendaciones extraídas de acuerdo con la interpretación de resultados.

1. Planteamiento del problema

De acuerdo con el Servicio Geológico Colombiano (SGC), algunos de los factores causantes de los movimientos en masa son la ocurrencia de lluvias y el cambio del uso del suelo. La zona Andina es la zona más afectada por movimientos en masa debido a su topografía montañosa. En esta zona se encuentra entre el 69,2% y el 70.1 % de la población del país (SGC, 2017). Cuando ocurren movimientos en masa hay, afectaciones a la población y, por tanto, generan un factor desfavorable en el desarrollo de Colombia (SGC, 2017). Las intensas lluvias generadas en el sur del Valle del Cauca traen consecuencias negativas para los habitantes de estas zonas. Los movimientos en masa provocados por lluvias limitan las vías de acceso e impiden el transporte de productos vitales para el consumo humano (Portafolio, 2022). La Unidad Nacional Para la Gestión de Riesgo de Desastres (UNGRD) indica que el 80% de la población colombiana está en amenaza por movimientos en masa (El Espectador, 2022).

De acuerdo con el SGC (2017), en el Departamento del Valle del Cauca predomina la categoría de amenaza relativa alta, con un 48.68 % de amenaza. En esta Categoría se localizan las zonas montañosas de las Cordilleras Central y Occidental. Los municipios de esta zona comúnmente presentan pendientes altas. Es por esto, que el 6.58% del área total presenta categoría de amenaza relativa muy alta, como muestran las figuras 1 y 2.

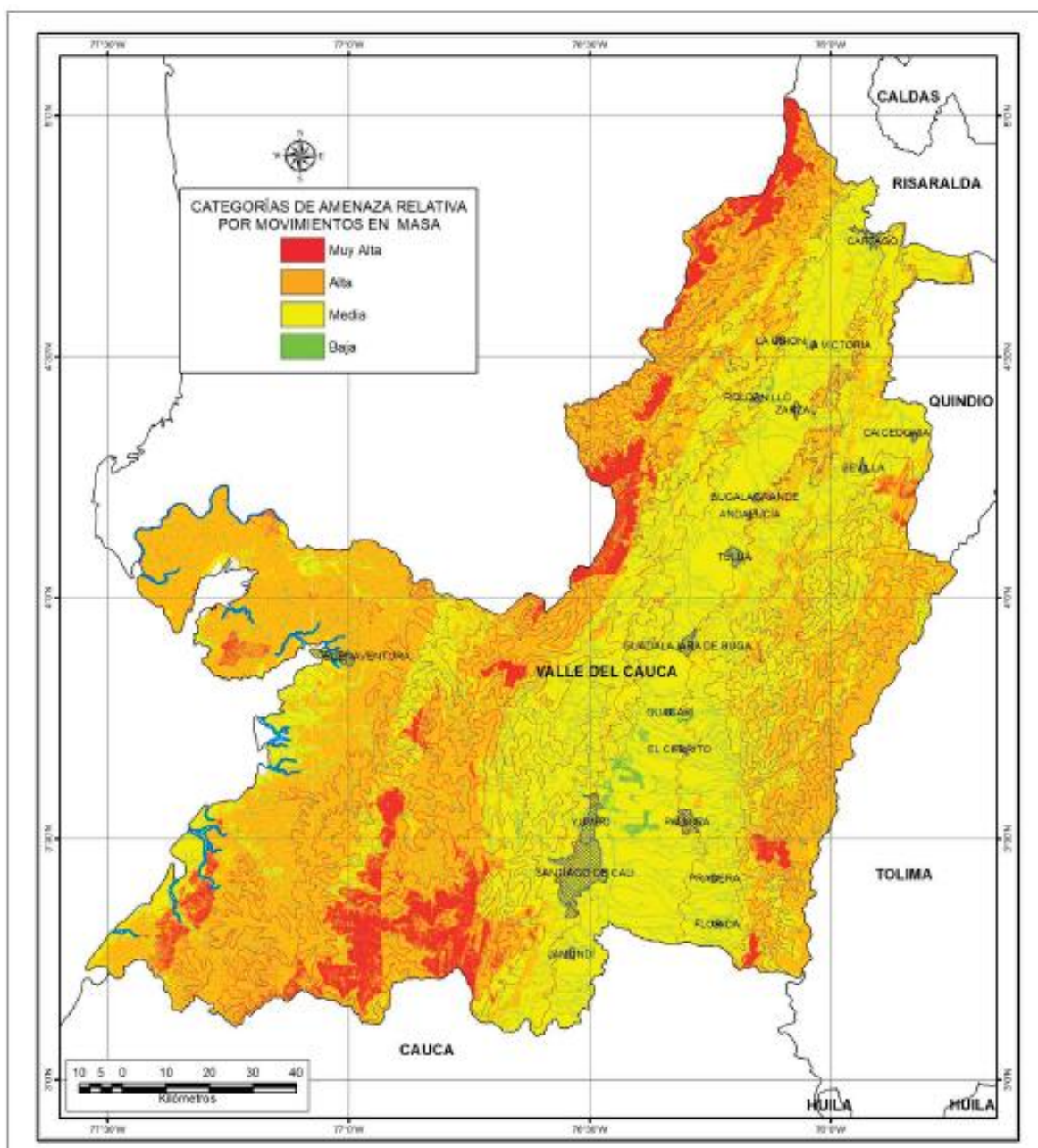


Figura 1. Amenaza relativa por movimiento en masa para el departamento del Valle del Cauca. Fuente: SGC (2017)

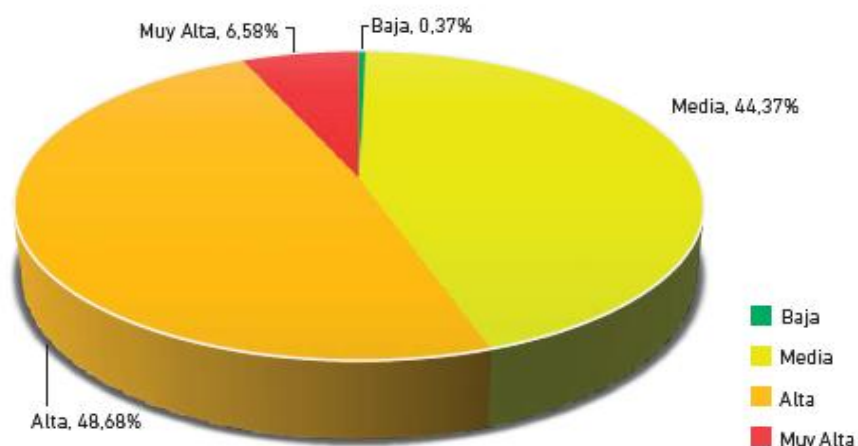


Figura 2. Porcentajes. Categorías de amenaza relativa por movimiento en masa para el departamento del Valle del Cauca. Fuente: SGC (2017)

Los factores que influyen en los movimientos en masa son diversos y de distinta naturaleza. El relieve topográfico abrupto está presente en gran parte del territorio colombiano. Las cordilleras Occidental, Central y Oriental hacen de los movimientos en masa un proceso natural. Además, las lluvias intensas y de larga duración son factores desencadenantes de movimientos en masa (SGC, 2017). Según el Espectador (2022) con datos de la UNGRD, en los últimos 100 años se han registrado en Colombia 11.800 eventos relacionados con movimientos en masa. Como consecuencia de ello, aproximadamente 7.590 personas han muerto y 239.740 familias han resultado afectadas, ver figura 3.

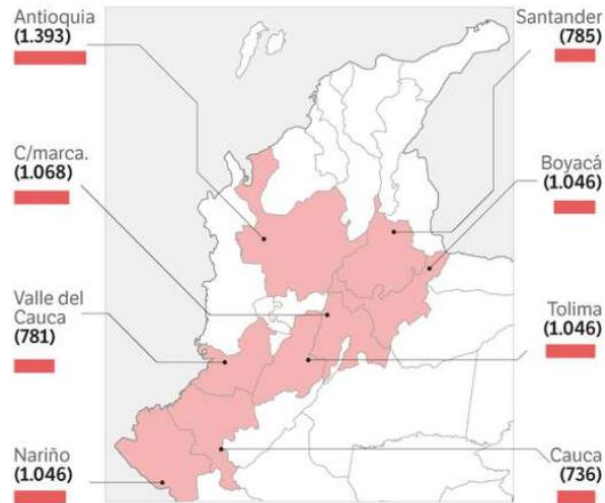


Figura 3. Mayor número de movimientos en masa ocurridos en Colombia. Fuente: *El espectador* (2022)

En particular, en el municipio de Jamundí entre los años 1972 y 2012, el Plan Municipal de Gestión del Riesgos de Desastres (PMGRD) del municipio reporta que los movimientos en masa han generado un muerto y tres desaparecidos. Además, se reportan daños en la parte de infraestructura vial, cultivos e infraestructura educativa, entre otras (PMGRD, 2012).

1.1. Formulación del problema

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, se propone la siguiente pregunta de investigación.

¿Cuál es la influencia de las lluvias antecedentes en la estabilidad de taludes en un suelo laterítico de Jamundí (Valle del Cauca)?

1.2. Objetivos

A continuación, se presentan los objetivos que se pretenden alcanzar con la siguiente investigación

1.2.1. Objetivo general

El objetivo general es evaluar la influencia de las lluvias antecedentes en la estabilidad de taludes en un suelo laterítico de Jamundí (Valle del Cauca).

1.2.2. *Objetivos específicos*

- Recolectar información en cuanto propiedades mecánicas de los suelos lateríticos y precipitaciones en la zona de estudio.
- Recolectar información en cuanto a las curvas característica y las funciones de permeabilidad en suelos lateríticos.
- Elaborar patrones de lluvia antecedentes acorde a las precipitaciones registradas en la zona de estudio ubicada en Jamundí.
- Determinar la variación del factor de seguridad en función de los patrones de lluvia antecedente.

1.3. Justificación

Los movimientos en masa son causantes de pérdidas humanas con miles de muertes por año. En la figura 4 se presenta la distribución de muertes ocasionadas por movimientos en masa causados por lluvias, según el Catálogo Global de Deslizamientos (GLC) para el período 2007 a 2017. El incremento de víctimas por este tipo de sucesos aumenta a nivel mundial (NASA's Scientific Visualization Studio, 2018).

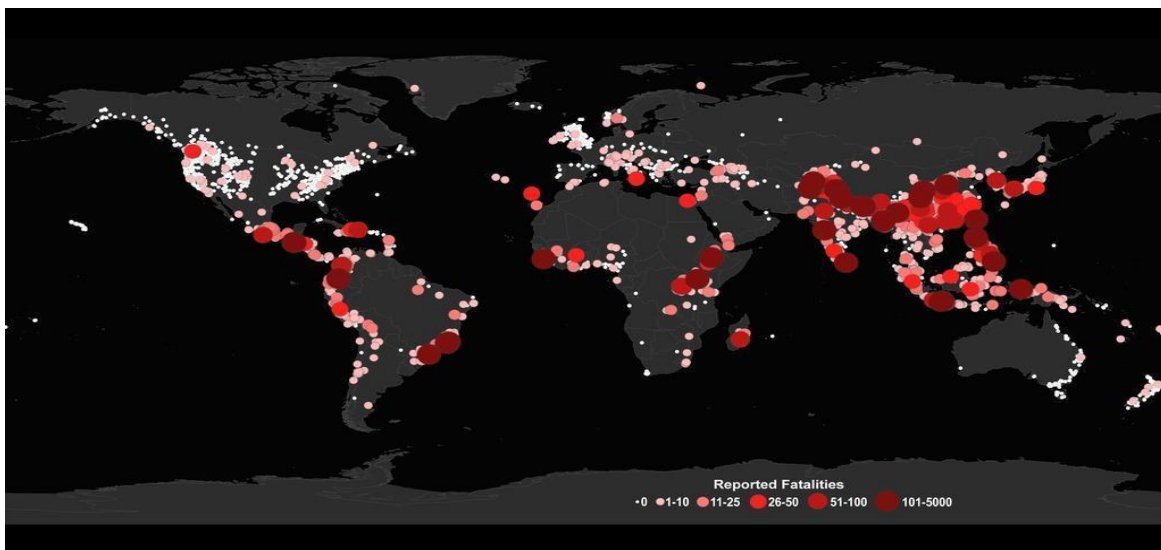


Figura 4. Distribución de los fallecidos reportados por movimientos en masa, causados a nivel global por lluvias entre los años 2007 y 2017. Víctimas fatales con rangos de 1 a 5000. Fuente: NASA's Scientific Visualization Studio (2018)

Además, la infraestructura afectada involucra millones de dólares en pérdidas económicas. El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) ha establecido indicadores para la gestión de riesgos de desastres. La figura 5 muestra el Índice de Déficit Por Desastre (IDD), el cual relaciona la pérdida económica que podría sufrir un país cuando se enfrenta a un evento catastrófico, entre ellos los movimientos en masa. En el 2010 el (BID) estableció que un IDD mayor a uno significa incapacidad económica para afrontar la ocurrencia de un evento catastrófico. A mayor IDD, mayor es el déficit presupuestal. Colombia se ubica en el puesto trece con un IDD de 0.12 entre países latinos (BID, 2010).

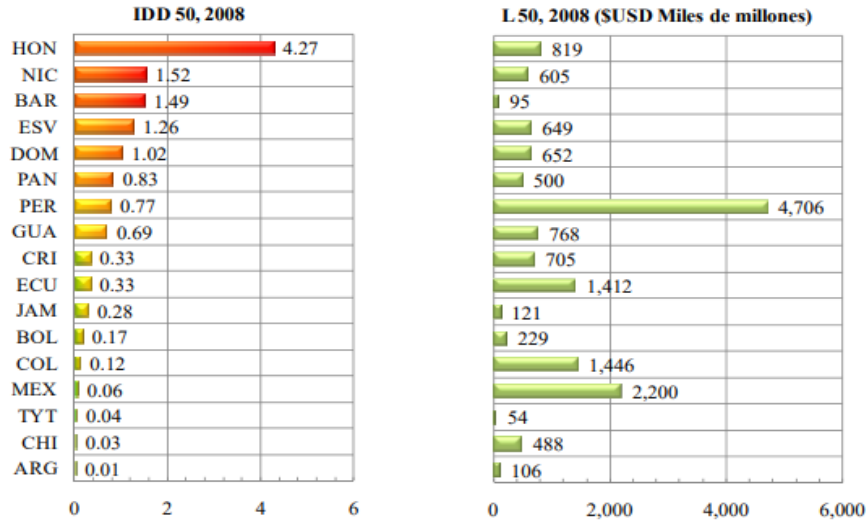


Figura 5. *IDD y pérdidas en miles de millones de dólares por eventos catastróficos probables en 50 años para algunos países latinos. Fuente: BID (2010)*

Aunque en Colombia los movimientos en masa han recibido atención adecuada, se debe seguir desarrollando estudios para comprender de mejor manera su génesis. Entre estos estudios se encuentran los que involucran umbrales de lluvia detonante (BID, 2010).

El cambio climático ha modificado las condiciones meteorológicas locales. Un ejemplo de esto son las sequías, ciclones y fuertes precipitaciones. Generalmente se ha observado un incremento considerable en las intensidades de sequías y precipitaciones (IPCC, 2021), ver figura 6.

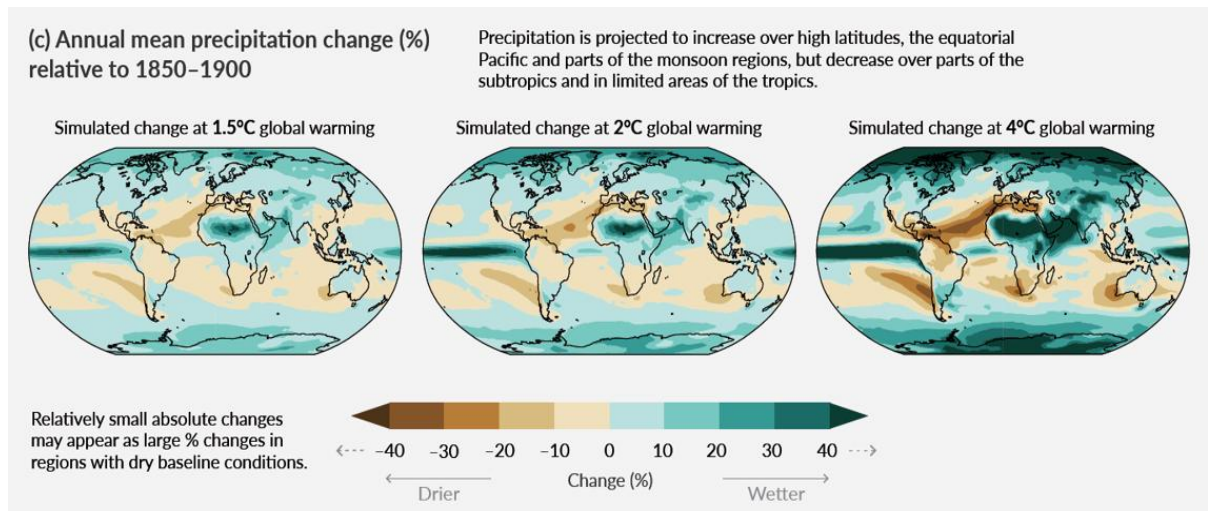


Figura 6. Variación en el porcentaje de las precipitaciones promedio anual con respecto a 1850 – 1900. Fuente: IPCC (2021)

2. Marco de referencia

2.1. Marco teórico

En la siguiente sección se relacionan conceptos básicos y fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

2.1.1. Movimientos en masa

Los movimientos en masa son modificaciones del terreno. Estos suceden para que una masa de suelo o roca alcance una condición de equilibrio ante condiciones geológicas, climatológicas y vibraciones. Los movimientos en masa también hacen referencia a movimientos de suelos o roca en el sustrato sobre una o varias superficies de rotura. Las áreas propensas a inestabilidad son las zonas montañosas y escarpadas. Suelen ocurrir en laderas naturales y taludes. Autores como Varnes (1984) y Hutchinson en (1988), definieron varios tipos de movimientos en masa, estas definiciones han contribuido al estudio de este importante fenómeno natural, como lo muestra la figura 7, los más relevantes son los deslizamientos rotacionales, deslizamientos traslacionales, deslizamiento por flujos, deslizamientos por desprendimientos, deslizamientos por vuelcos, avalanchas y deslizamientos laterales (Vallejo et al., 2002).

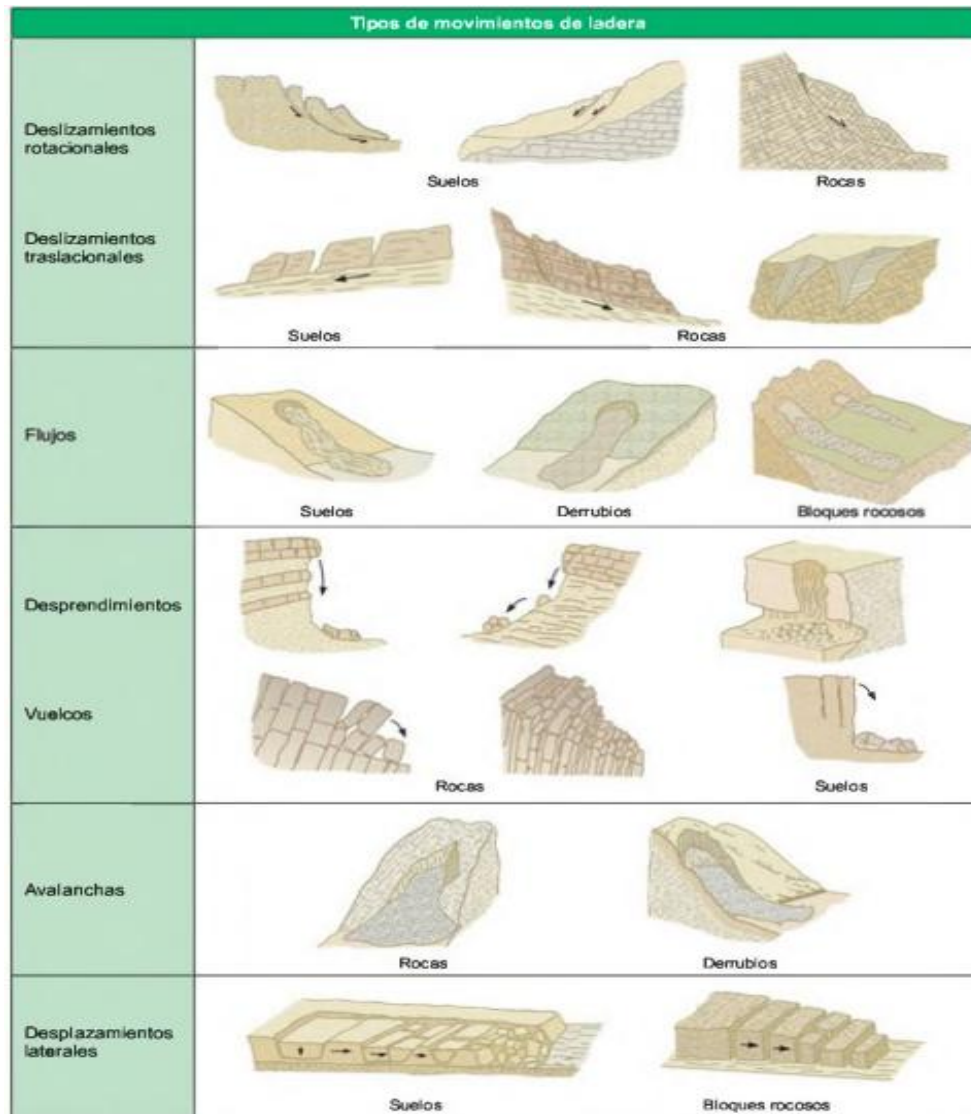


Figura 7. Clasificación simplificada de diferentes tipos de movimientos en masa en función de los mecanismos de rotura y del tipo de material. Fuente: Vallejo et al. (2002)

2.1.1.1. Deslizamientos rotacionales y deslizamientos traslacionales

Los deslizamientos rotacionales se generan comúnmente en suelos homogéneos y cohesivos. Estos deslizamientos tienden a tener formas curvas, luego del inicio de la inestabilidad pueden formar bloques. Estos bloques pueden ser superficiales y profundos con variaciones en profundidad de diez metros (Vallejo et al., 2002)

En suelos como arcillas muy duras con fisuras cercanas al ángulo de equilibrio y arcillas blandas pueden darse deslizamientos sensitivos, dependiendo del contenido de agua y el tipo de suelo pueden llegar a formar flujos. En la figura 8 se muestran este tipo de deslizamientos rotacionales.

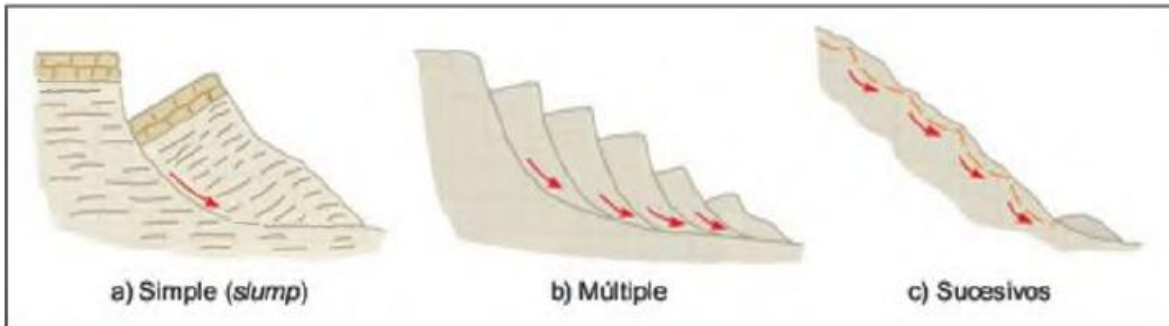


Figura 8 Diferentes tipos de deslizamientos rotacionales. Fuente: Vallejo et al. (2002)

En los deslizamientos de tipo traslacional las roturas de falla están a favor de una superficie plana con debilidad preexistente, generalmente no muy profundos, pero extensos. Suelen darse en suelos y rocas son comunes en formas rectangulares, presentan una pendiente alta y son más rápidos que los rotacionales (Vallejo et al., 2002).

2.1.1.2. Flujos

También conocidos como coladas (flujos de barro o tierra), coladas de bloques rocosos (fragmentos de rocas) y derrubios (combinación de diferentes tamaños de rocas). En todos los casos anteriores se presenta abundante agua, lo cual conlleva a que se comporten como un fluido. Presentes en laderas con pendientes bajas con ángulos menores a diez grados. En suelos con poca cohesión y arcillosos susceptibles a pérdida de resistencia Las coladas de tierra generalmente se dan en materiales finos y homogéneos. La pérdida de su resistencia es influenciada por abundante agua. Se pueden clasificar por el material, resistencia y cantidad de agua presente (Vallejo et al., 2002), ver figura 9.

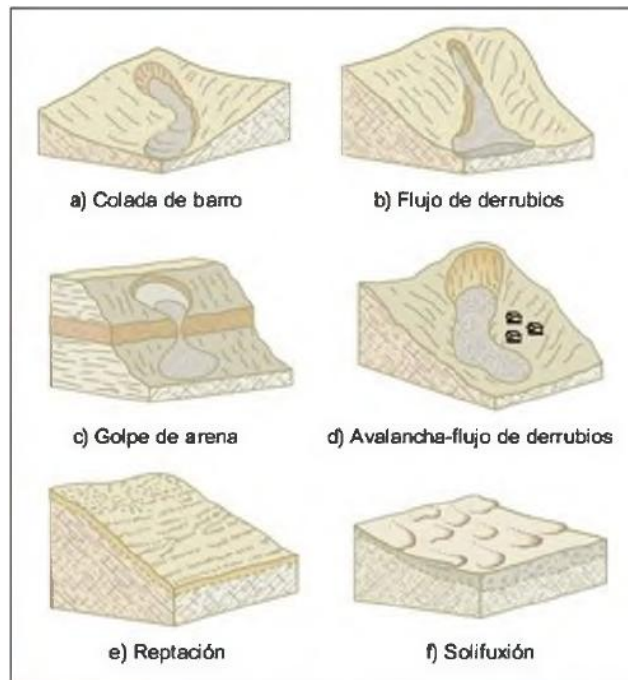


Figura 9. *Diferentes tipos de flujos. Fuente: Vallejo et al. (2002)*

2.1.1.3. Desprendimientos y vuelcos

Hace referencia a bloques y masas de rocas que han sufrido planos de discontinuidad, son muy frecuentes en laderas de zonas montañosas. Las fallas generadas por estos desprendimientos son en forma de cuña y en bloques con diferentes discontinuidades. Entre los factores que contribuyen a este proceso se encuentran sismos, agua que filtra las grietas, pérdida de apoyo en los bloques (Vallejo et al., 2002).

2.1.1.4. Avalanchas

Estos movimientos son complejos y muy rápidos, son materiales rocosos y derrubios los cuales están acompañados de nieve y hielo. Se presenta distribución de tamaños de partículas. La poca cohesión y debilidad en los materiales son factores que influyen en este fenómeno. Las avalanchas pueden superar los 100 km/h incluso con los materiales en estado seco debido a los espacios entre partículas y disminución de fricción entre ellas. Otros fenómenos que influyen en este proceso son sismos, erupciones de volcanes, agua de precipitaciones o

deshielo. En avalanchas de derrubios se presentan materiales con distribución de tamaños, con inclusión de bloques grandes y finos (Vallejo et al., 2002).

2.1.1.5. Desplazamientos laterales

Estos desplazamientos pueden presentar diferentes denominaciones, también llamados extensiones laterales. Son movimientos de masas de suelo o bloques rocosos muy cementados y están sobre materiales deformables. Estos se desplazan muy lentamente con el paso del tiempo y en pendientes relativamente suaves. Los factores que los originan son la licuefacción del material bajo la superficie, reacomodo de arcillas blandas bajo el peso de masas del suelo. Generalmente en superficie, tienen aspecto de fragmentos (Vallejo et al., 2002).

2.1.1.6. Causas y factores de movimientos en masa

Los factores que influyen en la estabilidad de laderas están relacionados con factores condicionantes, estos factores dependen de la naturaleza y composición del terreno. Igualmente relaciona los factores desencadenantes que se relacionan con agentes externos que provocan inestabilidades, entre los factores condicionantes podemos encontrar: relieve (pendientes y geometría) influye en la distribución del peso y el terreno. La litología (textura y composición) influye en la resistencia y densidad. La estructura geológica y estado tensional que tiene efecto en la deformabilidad y la anisotropía. La meteorización influye en cambios físicos y químicos que generan erosión y trae consigo zonas de debilidad, deforestación entre otros (Vallejo et al., 2002).

Entre los factores desencadenantes se encuentran, por ejemplo: las precipitaciones y aportes de agua que influyen en variaciones de las presiones intersticiales y peso del terreno. Por otra parte, las acciones climáticas que influyen en la generación de grietas ocasionando debilidad en el terreno y disminución en propiedades resistentes. Los factores que contribuyen a la disminución de la resistencia al corte son: alternancia de materiales con distinta permeabilidad, composición, textura, estructura, fracturas y fallas. Los efectos de la meteorización y efectos fisicoquímicas como desecación de arcillas y roca arcillosa, desintegración de roca e hidratación de minerales arcillosos. Los cambios en la estructura como remoldeo de suelos finos, entre ellas las arcillas sensitivas, debilidad en resistencia

debido a procesos del creep y por último y muy importante los cambios en las fuerzas intergranulares debidas al agua y a las presiones de poro como precipitaciones y riegos (Vallejo et al., 2002).

Entre los factores que generan aumento de esfuerzos al corte se encuentran los sismos, lluvias, erosión interna o subterránea, movimientos en masa. Sobrecargas naturales como peso generado por lluvias. Presiones laterales por agua en las grietas y presencia de materiales expansivos (Vallejo et al., 2002).

2.1.2. Suelos lateríticos

Generalmente se presentan dos factores relevantes en la formación de suelos lateríticos, el clima y la roca madre, gran parte de los movimientos en masa ocurridos en zonas tropicales húmedas ocurren sobre este tipo de suelos (Guardado, 2006). En la Cordillera Occidental, los suelos lateríticos son suelos residuales producto de la meteorización química de las rocas de la Formación Volcánica. Estos suelos son arcillas limosas rojizas (Ingeominas, 1984).

Este tipo de suelos son típicos de regiones tropicales, se caracterizan por la ausencia de sílice, ricos en óxidos de hierro y aluminio (Tibasosa, 2018). Las temperaturas y precipitaciones también son factores que inducen a la formación de suelos lateríticos. Como muestra la figura 10, estas zonas se encuentran entre las latitudes 35° N y 35° S. Ubicadas entre los trópicos de Cáncer y de Capricornio (Gidigasú y Tibasosa, 2018).

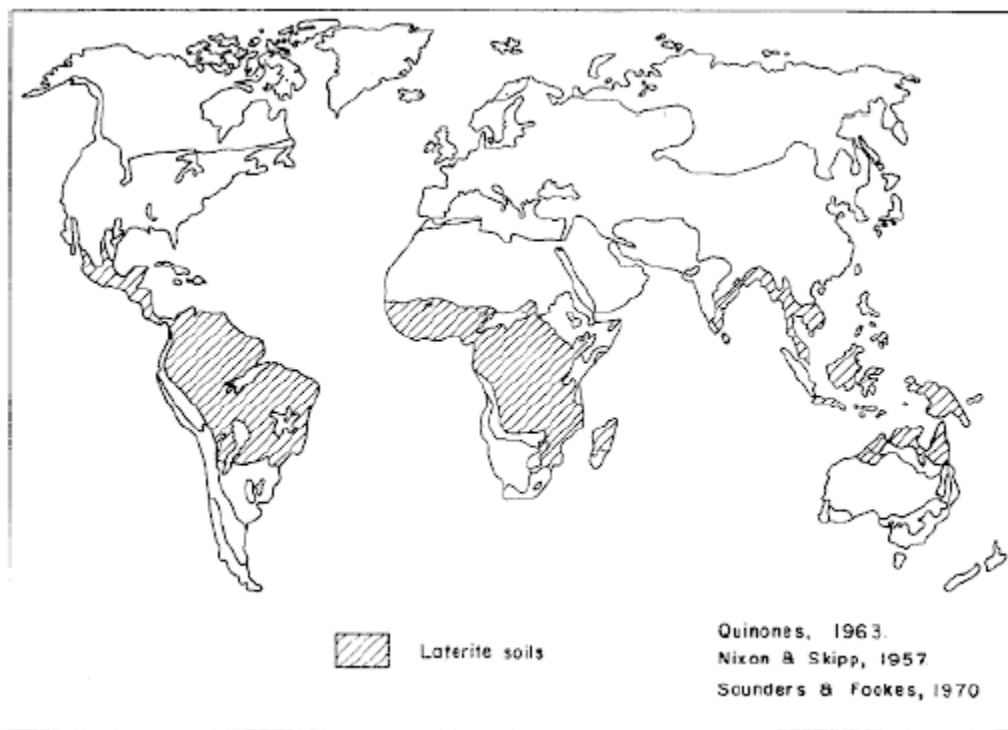


Figura 10. Distribución general de suelos lateríticos. Fuente: Gidigasú y Tibasosa, (2018)

Los suelos lateríticos se conforman por una microestructura de apariencia homogénea e isotrópica, tienden a tener una resistencia a la erosión. Algunas de sus características son alta permeabilidad, poca expansión y baja plasticidad (Gidigasú y Tibasosa, 2018).

2.1.2.1. Procesos de laterización

Los procesos de laterización implican la meteorización física y química de las rocas primarias. Estos procesos dan origen a minerales tales como arcillas y óxidos e hidróxidos de Fe, Al, Ti y Mn (Gidigasú y Tibasosa, 2018).

2.1.2.2. Curva característica del suelo y función permeabilidad

La CURVA CARACTERISTICA DEL SUELO (SWCC, por sus siglas en inglés) relaciona el contenido de agua de un suelo con la succión matricial del suelo. Está relacionada directamente con las características del suelo, tales como granulometría, estructura y composición. La función permeabilidad o de conductividad hidráulica, representa la relación entre la permeabilidad y la succión matricial de un suelo. Generalmente esta función se

obtiene a partir de la SWCC mediante modelos de estimación y ensayos de laboratorio (López y Mendoza, 2016; Meza, 2012), autores como Fredlund y Xing (1994), establecieron el valor del contenido volumétrico de agua de la siguiente manera.

$$\theta = \theta_s \left(1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln(1 + 1000000/\psi_r)} \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

θ : es el contenido volumétrico de agua

θ_s : es la unidad volumétrica de saturación de la curva de secado

ψ : es la succión total en kPa

ψ_r : es la succión en kPa, correspondiente al contenido de agua residual θ_r

La Zona capilar o saturada es donde el suelo está en estado saturado, termina en donde hay presencia de aire. La zona de secado o Desaturación es donde el agua se desplaza debido al ingreso del aire en los poros. La zona residual contiene succiones altas, las variaciones en la succión no producen cambios significativos en el contenido volumétrico de agua (López y Mendoza, 2016), ver figura 11.

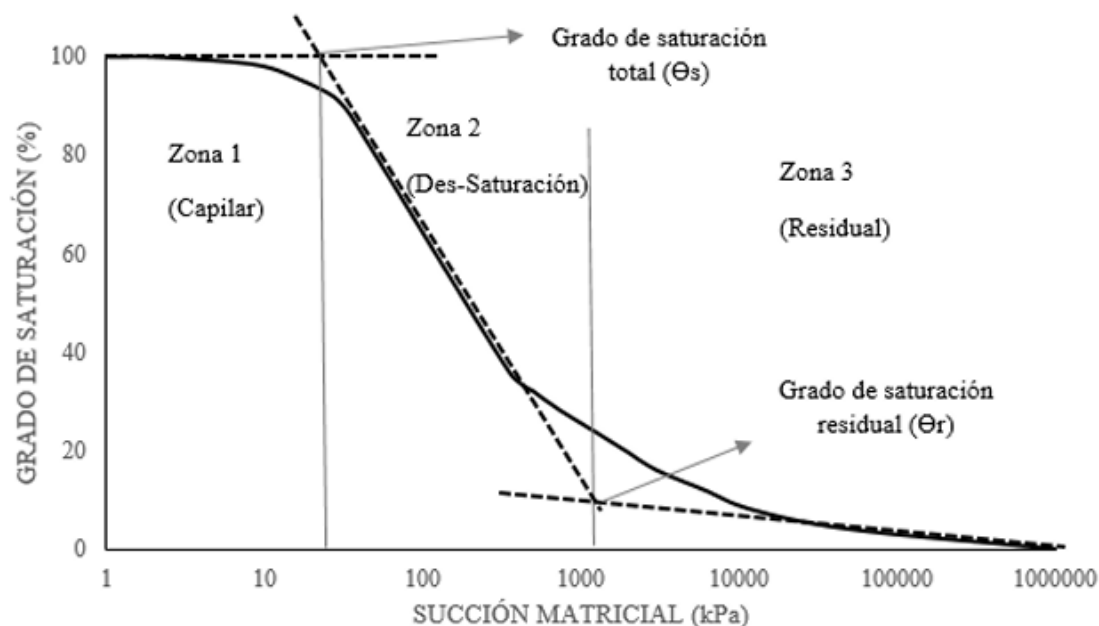


Figura 11. Zonas de la curva característica de un suelo. Fuente: Fresneda (2019)

Una de las franjas negras horizontales (zona1) corresponde al valor de entrada de aire. En esta etapa el aire de succión da inicio al desalojo del agua presente en poros y sobre todo en

los poros de gran tamaño. La otra franja negra horizontal (zona3) pertenece al valor residual, en esta etapa la succión representada en la fase líquida del suelo empieza a ser discontinua. Sobre las partículas de suelo toma formas de películas delgadas. La franja negra vertical inferior denominada contenido de agua residual (θ_r) corresponde a contenidos de agua en donde se requieren valores grandes de succión para desalojar agua adicional del suelo. Finalmente se encuentra la franja negra superior denominada contenido de agua saturado o grado de saturación total (θ_s). Esta hace referencia a la cantidad de agua en suelo en estado saturado. (López y Mendoza, 2016).

Las curvas características del suelo son únicas para cada tipo de suelo y muchas de ellas dependen del grado de compactación en que se encuentra el suelo. Igualmente establece el fenómeno de histéresis en este tipo de curvas, resultado del procedimiento de secado. (Carrasco, 2017).

2.1.2.3. Ecuaciones que describen las curvas características del suelo

Según Carrasco (2017), diversos modelos experimentales son usados para modelos de curvas características. Estos modelos son Brooks (1964), Corey (1958), Van Genuchten (1980) y Fredlund y Xing (1994) quienes establecieron la ecuación del contenido volumétrico de agua con un término de ajuste relacionado con parámetros obtenidos en laboratorio, ver ecuación

2

$$\theta = \theta_s \left(1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln(1 + 1000000/\psi_r)} \right) \left(\frac{1}{\ln(e + (\frac{\psi}{\alpha})^n)} \right)^m \quad \text{Ecuación 2}$$

θ : es el contenido volumétrico de agua

θ_s : es la unidad volumétrica de saturación de la curva de secado

ψ : es la succión total en kPa.

e : es el número de Euler.

ψ_r : es la succión en kPa, correspondiente al contenido de agua residual θ_r

α : es un parámetro del suelo que se encuentra relacionado con el valor de entrada de aire.

n : es un parámetro del suelo que controla el punto de inflexión de la curva característica del suelo.

m : es un parámetro del suelo que se encuentra relacionado con el contenido de agua residual.

La curva característica representada mediante la ecuación de Fredlund y Xing (1994) contiene un amplio rango de valores de succión. Representa una relación directa entre el contenido volumétrico de agua y la succión. Los valores de a , m y n son de carácter empírico por esta razón la curva se ajusta a partir de datos experimentales obtenidos en el laboratorio (Carrasco, 2017).

Función permeabilidad

López y Mendoza, (2016) establecen que la función permeabilidad describe la relación entre la succión de un suelo y la conductividad hidráulica y puede obtenerse mediante la curva característica del suelo. Igualmente nombran a los modelos de regresión, estos hacen referencia a las pruebas en laboratorio, en ellas se puede establecer por técnicas de estimación. Ejemplo de ello son autores como Fred Lund y Xing (1994). La guía de Geoslope internacional Ltd. 2012, establece una curva de permeabilidad y está en función de la curva característica del suelo. La función permeabilidad es el producto entre la permeabilidad saturada k_s y la primera derivada de la curva característica del suelo. Para suelos parcialmente saturados k es función de la succión matricial y del contenido de humedad (Rahimi et al., 2011).

2.1.3. *Succión matricial*

La succión total de un suelo no saturado es la presión negativa, relativa a la presión externa de un gas sobre el agua del suelo (Alfaro, 2008). Esta tiene dos componentes, la succión matricial y la succión osmótica. La succión osmótica se debe a la concentración de sales en el agua de los poros. La succión matricial es la diferencia entre la presión del agua en los poros y la presión de aire en poros (Sondon, 2016).

Otro concepto relacionado con la succión es la capilaridad, es un fenómeno físico característico de los líquidos. Generalmente en suelos, este fenómeno se presenta a la altura del nivel freático hacia arriba. El agua asciende por los poros del suelo y se forma una franja capilar. Esta zona está saturada con una presión negativa. La altura capilar en suelos de grano fino es mayor que en suelos de grano grueso. El cálculo de la altura capilar es dispendioso debido a la variedad de partículas y tamaño de poros (Meza, 2012).

2.1.4. Ley de Darcy

Mediante la observación del flujo en arenas limpias Darcy concluyó que la velocidad de descarga del agua en suelos saturados está en función de la permeabilidad del suelo y el gradiente hidráulico (Das, 2015), como se muestra a continuación.

$$v = k_i \quad \text{Ecuación 3}$$

v: es la velocidad de descarga en dirección del flujo.

k: permeabilidad del suelo.

i: Pérdida de carga

2.1.5. Conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad

La conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad es la constante de proporcionalidad entre la velocidad de descarga y el gradiente hidráulico en el flujo de agua a través de un suelo. Esta relación está dada por la Ley de Darcy (1856). El valor de conductividad hidráulica, k depende de factores tales como la viscosidad del fluido en los poros, la distribución de tamaños de grano, la forma de los granos, la relación de vacíos y el grado de saturación del suelo. En suelos saturados, k es una constante, el valor de la permeabilidad varía en diferentes tipos de suelos, en suelos no saturados la permeabilidad es menor y aumenta en función de la saturación. La permeabilidad también está relacionada con propiedades del fluido (Das, 2015), ver ecuación 4.

$$k = \frac{\gamma_w}{\eta} \check{K} \quad \text{Ecuación 4}$$

k: es la permeabilidad

γ_w : es el peso unitario del agua

η : es el coeficiente de viscosidad del fluido

$\check{K}$: es la permeabilidad absoluta.

En la tabla 1 se relacionan los valores típicos de permeabilidad para los suelos saturados:

Valores típicos de permeabilidad para suelos saturados	
Tipo de suelo	k en (cms/s)
Grava limpia	100 - 1
Arena gruesa	1.0 - 0.01
Arena fina	0.01 - 0.001
Arcilla limosa	0.001 - 0.00001
Arcilla	< 0.000001

Tabla 1. Valores típicos del coeficiente de permeabilidad para suelos saturados. Fuente: Das (2015)

2.1.6. Envolvente de resistencia para suelos parcialmente saturados

La resistencia al corte de un suelo es la resistencia interna por unidad de área que la masa de suelo ofrece a la falla y deslizamiento a lo largo de un plano en cualquier dirección en su interior (Das, 2015). En el análisis de taludes es comúnmente usada la ecuación de resistencia al corte con contribución de la succión matricial. Esta ecuación establece que las combinaciones de las variables $(\sigma_n - u_a)$ y $(u_a - u_w)$, pueden reproducir la resistencia al corte en un suelo no saturado. Esta ecuación se representa mediante la siguiente expresión.

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a)\phi' + (u_a - u_w)\tan \phi_b \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

τ : es la resistencia al corte no saturado.

c' : es la cohesión efectiva.

σ_n : es el esfuerzo normal total.

u_a : es la presión de aire en los poros.

$(\sigma_n - u_a)$: es el esfuerzo normal neto.

$(u_a - u_w)$: es la succión matricial.

u_w : es la presión del agua en los poros.

ϕ' : es el ángulo efectivo de fricción interna.

ϕ_b : Es el ángulo indicador de la tasa de cambio de resistencia al corte y en función de la succión matricial. Fredlund et al. (1978) y Rahimi et al. (2011).

2.1.7. Factor de seguridad de un talud

Es de vital importancia hacer la comparación entre la resistencia al corte en la superficie de falla más probable y la resistencia al corte de un suelo. Este proceso es importante para la seguridad en estabilidad de taludes naturales y artificiales. Aunque debido a la estratigrafía del suelo, parámetros de resistencia, filtraciones del agua y elección de posibles superficies de falla, hace de este proceso un poco dispendioso (Das, 2015).

En superficies de suelo no horizontales el efecto por gravedad puede influir en la masa de suelo para que se mueva, como se muestra a continuación, figura 12

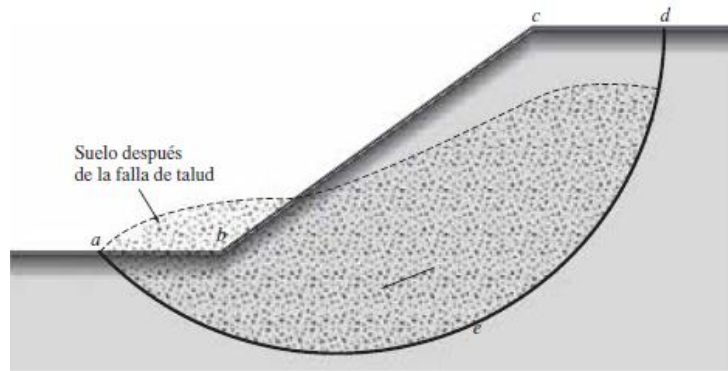


Figura 12. Masa de suelo *abcdea* antes y después de falla. Fuente: Das (2015)

El Factor de Seguridad (FS), de un talud se utiliza para evaluar la estabilidad de dicho talud (Das, 2015), ver ecuación 6.

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

τ_f : es la resistencia medida del suelo al corte.

τ_d : es el esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de la superficie potencial de falla.

De igual manera Das (2015) establece la resistencia media del suelo al corte está definida mediante la siguiente ecuación.

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

c' : es la cohesión.

ϕ' : es el Ángulo de fricción interna en condición drenada

σ' : es el esfuerzo normal efectivo en la superficie potencial de falla.

2.1.8. Lluvias

La condensación del vapor en la atmosfera genera precipitaciones. Al saturarse el vapor de agua en la atmosfera se condensa y cae a la superficie de la tierra, a este proceso se le conoce como, precipitación, las precipitaciones pueden manifestarse como lluvia, lluvias congeladas, llovizna, nieve, agua nieve o granizo (Genovés, 2018).

Según Apaza (2019) las lluvias con tamaño de gotas mayor a 0.05mm o más pequeñas y dispersas, se pueden clasificar en orográfica conectiva y frontal.

Los movimientos en masa están influenciados por las precipitaciones y sus principales características como, volumen , intensidad y distribución, Por este motivo es importante tener en cuenta la respuesta del terreno ante precipitaciones en el tiempo. El agua es un factor determinante en la inestabilidad de un movimiento en masa, afecta las tensiones y presiones intersticiales, adiciona peso a la masa del suelo, afecta la resistencia de los materiales presentes, igualmente, el origen de flujos subsuperficiales y subterráneos, esto lleva al aumento de presencia de agua en la zona no saturada e influye en la variación del nivel freático (Vallejo et al., 2002).

La infiltración de agua en el terreno está en función de diversos factores como: intensidad y duración de lluvias, agua existente en el terreno natural (nivel freático y grado de saturación), permeabilidad, topografía y presencia de vegetación entre otras (Vallejo et al., 2002), ver figura 13.

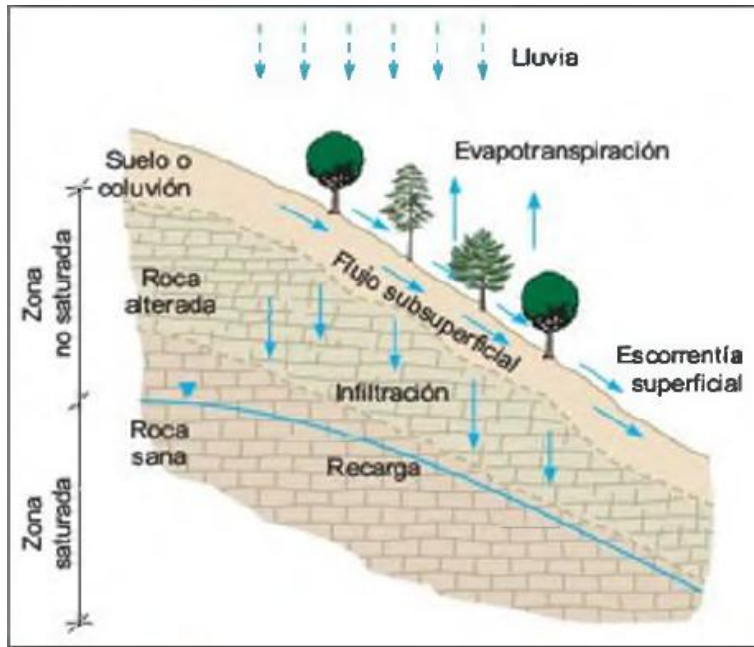


Figura 13. Esquema de circulación de agua en una ladera. Fuente: Vallejo et al. (2002)

2.1.8.1. *Hietogramas*

Como se presenta en la figura 14, un hietograma es un gráfico que expresa el cambio de la profundidad en mm en una superficie debido a una lluvia, o la intensidad de una lluvia en mm/h, con el tiempo. Los periodos de tiempo pueden variar desde años hasta horas. Se puede presentar como un gráfico de barras o un gráfico de líneas (Apaza, 2019).

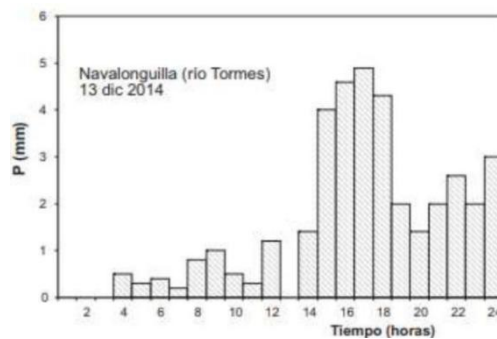


Figura 14. Esquema Hietograma. Fuente: Apaza (2019)

2.1.8.2. *Lluvia antecedente y patrones de lluvia*

La lluvia antecedente hace referencia a la lluvia que cae de días a horas antes de un movimiento en masa, los patrones de lluvia representan la variación de una precipitación con

el tiempo. Como muestra la figura 15, los principales patrones de lluvia son retardado, normal y avanzado dependiendo de cómo cambia la precipitación en el tiempo (Rahimi et al, 2011).

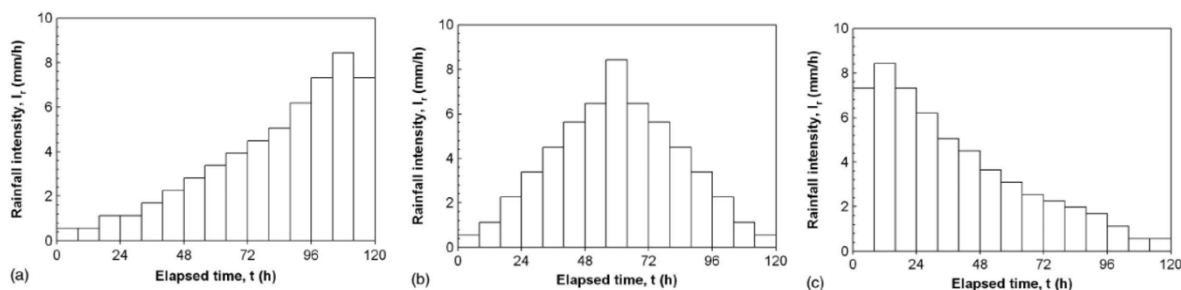


Figura 15. Histogramas de patrones de lluvia retardado, normal y avanzado. Fuente: Rahimi et al (2011)

Los patrones antecedentes de lluvias no han recibido la atención adecuada. Los patrones de lluvia han inducido a derrumbes en taludes especialmente en zona en donde están ubicados los trópicos (Rahimi et al., 2011), autores reconocidos deducen que, al infiltrarse el agua en el suelo debido a precipitaciones, la succión matricial es afectada, en consecuencia, la resistencia al corte del suelo disminuye y ocasiona derrumbes en las pendientes de taludes Yoshida et al.(1991) y Rahimi et al, (2011). Guzzetti et al. (2007) y Rahimi et al. (2011) encontraron mediante recopilación de información, relación entre deslizamientos y lluvias antecedentes, pero con duración que varían de un día hasta 120 días.

Para Rahimi et al. (2011), el tema es controvertido pues Marca (1984) afirma que, debido a la conductividad alta en suelos de Hong Kong, la lluvia antecedente no tuvo efecto en derrumbes de taludes. Sin embargo, para suelos en esta misma zona, lluvias con intensidades fuertes en un periodo corto si influyeron en el derrumbe de taludes.

Algunos autores han identificado intensidades y duración de lluvias que desencadenan inestabilidad en laderas. Estos datos están relacionados solo al sitio especificado, pues los factores son muy diversos entre variación de lugares (Vallejo et al, 2002), ver tabla 2.

Tipo de movimiento y país		Intensidad horaria (Ih)	Intensidad diaria (Id)	Precipitación acumulada
		Movimientos de nueva generación		
Flujos de barro y tierra	Hong Kong	>40 mm	>50 mm, >100 mm	>50 mm (15 días)
	Japón		>125 mm	>182 mm (2 días)
	Italia (Toscana)		86 mm	260 mm (15 días), 325 mm (30 días)
	Brasil	60 mm	>125 mm	>0.4 Anual (>675 mm en 3 días)
Flujos de derrubios	Estados Unidos (California)			>250 mm (3 días)
	España	213 mm		>52 mm durante el evento
Otros tipos de movimientos	Japón	20 mm		10-150 mm durante el evento
	Estados Unidos (California)			>180 mm durante el evento
	Italia (Toscana)		143 mm -153mm	290-400 mm (15 días), 360-450 mm (30 días)
	Francia			>300 mm (60 días)
	España		205mm	>500 mm 3 días, 476 mm (2 días)
Otros tipos de movimientos	España	>60 mm (clima atlántico)	>150 mm (clima atlántico), >180 mm (clima mediterráneo)	>300 mm (clima mediterráneo)
Reactivación o aceleración de movimientos				
Diversos tipos de movimiento	Italia			>520 mm (60 días) pequeños deslizamientos. >900 mm (100 días) grandes deslizamientos.
	Francia			300 mm (100 días)
	España			>250 mm (90 días)
	España			320 mm (15 días)

Tabla 2. Umbrales de precipitaciones para desencadenamiento de movimientos en ladera.

Fuente: Vallejo et al. (2002)

Reportes oficiales muestran que durante las precipitaciones ocurridas en España el 30% y 80% de la cantidad anual, corresponde a los 4 meses previos de los deslizamientos, ver tabla 3

Tipo de movimiento	Precipitación anual (mm)		Precipitación en los 3-4 meses previos en (mm)		
	Total, en el año previo (mm)	Media anual de la serie (mm)	Total, en los meses previos (mm)	% P total del año previo	% P media anual de la serie
Deslizamientos	500 a 1.000	500 a 800	300 a 500	50-60%	≤30%
Flujos de tierra	500 a 800	600 a 700	300 a 400	50-80%	50-60%
Flujos de derrubios	≥1.300	1.100 a 1.200	350 a 650	30-50%	50-120%
Desprendimientos	250 a 700	220 a 450	100 a 250	≤30%	50-130%

Tabla 3. Relación entre precipitaciones y desencadenamiento de movimientos en ladera.

Fuente: Vallejo et al. (2002)

2.1.8.3. Pluviómetros y pluviógrafos

Los pluviómetros son instrumentos de medición directa diseñados para medir las precipitaciones que caen en una superficie. Los pluviógrafos son instrumentos de medición continua. Estos miden la variación en el tiempo de la cantidad de agua que se ha precipitado. Para la ubicación de pluviómetros y pluviógrafos se deben escoger zonas abiertas alejadas de edificios o árboles Genovés, (2018) y Apaza, (2019).

Algunos pluviógrafos pueden ser de balanza, este recibe el agua en un receptáculo y toma mediciones en función del peso acumulado. A medida que el receptáculo se llena, las lecturas son convertidas a unidades de precipitación en milímetros (Genovés, 2018)

También existen los pluviógrafos de flotador, el agua es captada y dirigida a un sifón, a medida que se llena el flotador sube y este movimiento hace que un lápiz registre esta información (generalmente en un tambor giratorio). Al alcanzar un nivel máximo el sifón drena y se repite el proceso (Genovés, 2018).

2.1.8.4. Flujo estable y flujo transitorio

El flujo estable y flujo transitorio describen el flujo de agua en un suelo. El flujo estable no presenta cargas hidráulicas variables en el tiempo. Mientras tanto, el flujo transitorio presenta cargas hidráulicas variables con respecto al tiempo. El flujo transitorio se presenta en

llenados de embalses, en excavaciones y en taludes bajo condiciones de temporadas secas y de lluvias. Es de anotar que, para flujo transitorio, la conductividad hidráulica varía con el contenido de humedad y la succión matricial (López y Mendoza, 2016).

2.1.8.5. Ecuación Bernoulli

Según Bernoulli, la suma de la carga por presión, la velocidad de carga y el desnivel es igual a la altura total en un punto de agua en movimiento (Das, 2015) como se muestra a continuación:

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + Z \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

$\frac{u}{\gamma_w}$: es la presión de carga

$\frac{v^2}{2g}$: es la velocidad de carga

Z: es el desnivel.

u: es la presión

v: es la velocidad

g: es la aceleración debida a la gravedad.

γ_w : es el peso unitario del agua.

De igual manera Bernoulli determinó que al aplicar un flujo en un medio poroso la velocidad de carga es despreciable, por lo tanto, el término $\frac{v^2}{2g}$ puede omitirse. De esta manera la altura total está determinada por.

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + Z \quad \text{Ecuación 9}$$

en base a lo anterior se puede inferir que cuando la variación de cabezas totales entre dos puntos es nula, no hay un flujo, la velocidad es cero.

La pérdida de carga se puede expresar de forma adimensional (i), y está dado por la relación entre la variación de las cabezas totales (Δh) entre dos puntos y la longitud horizontal (L) (Das, 2015), ver ecuación 10

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

Δh : Variación de las cabezas totales entre dos puntos

L: Longitud horizontal entre dos puntos

2.1.8.5.1. Ecuación de continuidad de Laplace

El flujo del agua en el suelo no siempre va en una sola dirección y no es uniforme sobre el área perpendicular al flujo, considerando $\Delta h \neq 0$ y un suelo permeable, se puede deducir la ecuación de continuidad de Laplace (Das, 2015). Considerando un bloque elemental A de suelo, el bloque tiene dimensiones dx , dy y dz . Sean V_x y V_z las componentes de velocidad de descarga en las direcciones horizontal y vertical, respectivamente, ver figura 16.

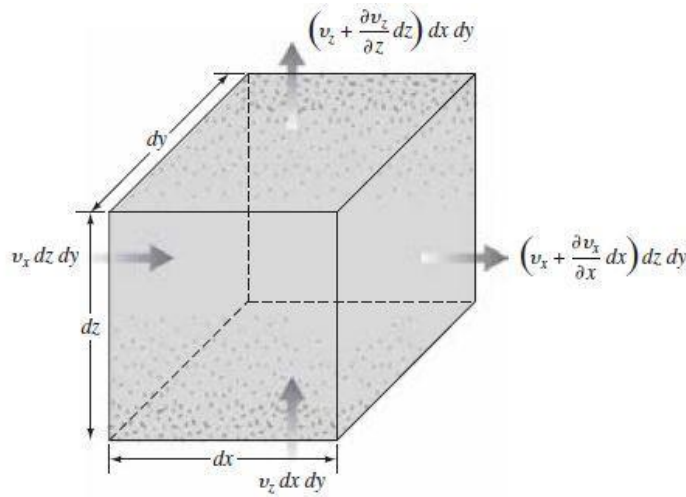


Figura 16. Comportamiento de flujo en bloque A. Fuente: Das (2015)

Teniendo en cuenta que el caudal de entrada debe ser igual al caudal de salida, la ley de Darcy y considerando un suelo no isotrópico, las velocidades de descarga en dos dimensiones se pueden expresar de la siguiente manera:

$$-k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

k_x k_z : Permeabilidad del suelo en las direcciones correspondientes x y y .

$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$: Variación de las cabezas totales con respecto al eje x

$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}$: Variación de las cabezas totales con respecto al eje y

Si se tiene un suelo isótropo las permeabilidades pueden omitirse, obteniendo la ecuación de continuidad para flujo en dos dimensiones

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad \text{Ecuación 12}$$

2.1.8.6. Ecuación de flujo de agua para el análisis de infiltraciones transitorias

La ecuación de infiltración del agua en suelos para flujo transitorio y bidimensional está dada por:

$$m^2 \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + q \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

m: es la pendiente de la curva característica agua-suelo.

γ_w : es el peso unitario del agua

h: es la cabeza total.

t: es el tiempo

q: es la taza del flujo del agua en el suelo.

k_x y k_z son los coeficientes de permeabilidad del suelo para la dirección x y z.

Estos valores son en función del contenido de humedad (GEO-SLOPE International Ltd., 2012).

La ecuación también es conocida como la ecuación de Richards (1931). La ecuación considera la relación entre la conductividad del suelo y la humedad característica del suelo (de laet, 2001. Castañeda. M, et al 2004). La solución de esta ecuación puede ser llevada a cabo con aproximaciones numéricas.

2.1.9. Modelos numéricos.

El potencial informático ha brindado herramientas computacionales para optimizar estudios en el ámbito ingenieril y análisis científico. Metodologías establecidas como el método de elementos finitos son usados como herramientas de aplicación. (Geo-slope internacional Ltd, 2012). Según la guía de Geo-slope internacional Ltd (2012), los resultados que brindan estas poderosas herramientas están en función del manejo del usuario. Hay preguntas básicas para un modelado ideal. Estas preguntas son: ¿Cuál es el objetivo principal del análisis?, ¿Cuál podría ser el resultado esperado? Y especifica que el análisis mental debe ser apropiado.

El modelo numérico hace referencia a una simulación matemática de un proceso físico real. Ejemplo de ello es el programa seep/w. Este simula el proceso de flujo de agua en un medio particulado. Este modelo es muy diferente de modelos físicos implementados en laboratorio. Rulon (1985) estableció un modelo a escala de filtración de precipitación. Se incrustaron equipos de medición de presiones de poro en una pendiente. Esta pendiente tenía un suelo menos permeable incrustado dentro de ella. Se regó agua en la cresta del talud simulando una precipitación, se realizó un modelo numérico con seep/w. con las mismas características (Geo-slope internacional Ltd, 2012), ver figura 17 y figura 18.

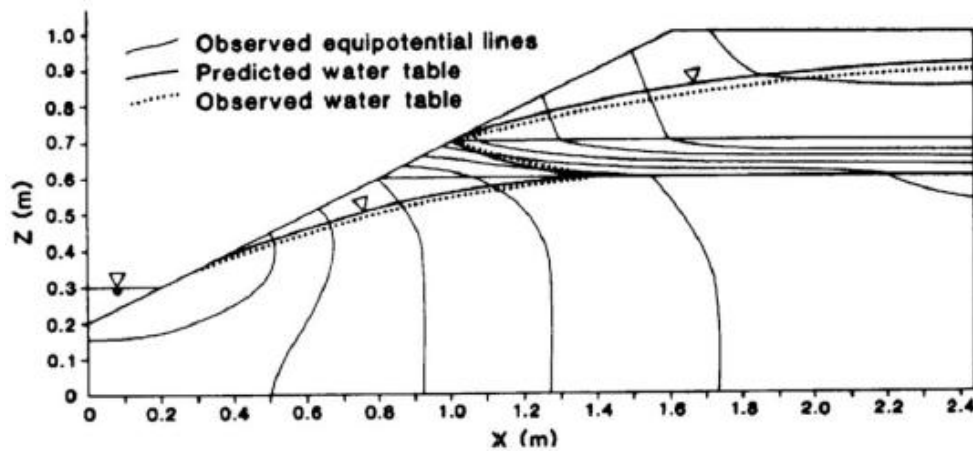


Figura 17. Resultados de modelo a escala en laboratorio de Rulon 1895. Fuente: Geo-slope internacional Ltd (2012)

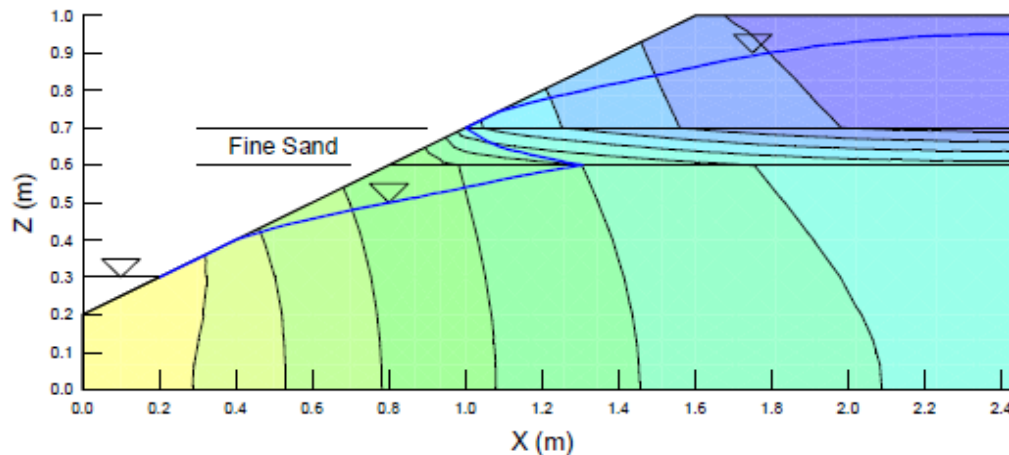


Figura 18. Análisis de seep/w del modelo Rulon 1895. Fuente: Geo-slope internacional Ltd (2012)

Las líneas equipotenciales tienen variaciones, el nivel freático es el mismo. El modelado numérico presenta una serie de ventajas respecto de los modelos físicos. Como, por ejemplo:

1. La configuración del modelo numérico es mucho más rápida que una configuración de un modelo físico.
2. Los modelos numéricos se pueden emplear para evaluar una gran variedad de escenarios.
3. Los modelos numéricos no generan daños a personal. Por el contrario, los modelos físicos pueden ocasionar daño por manipulaciones de equipos de gran tamaño.
4. Pueden tener en cuenta la gravedad. Mientras que un modelo en laboratorio no la puede representar porque no se puede escalar.

Es necesario indicar que los modelos numéricos también tienen limitaciones. Por ejemplo, dentro de algunos programas de filtración, el proceso de evaporación de la humedad no está dentro de los componentes. Pero se podría tener en cuenta en un laboratorio. (Geo-slope internacional Ltd, 2012).

2.2. Antecedentes

Rahimil, A. Rahardjo, H., & Leong, E (2011). “Effect of Antecedent Rainfall Patterns on Rainfall- Induced Slope Failure”

Analizaron el efecto de las lluvias antecedentes ocurridas en Singapur en la incidencia de falla de taludes. Para modelar la lluvia antecedente se utilizaron los patrones de lluvia presentados en la figura 15. Se usaron dos tipos de suelos de esta zona, un suelo de alta conductividad hidráulica (HC, por sus siglas en inglés) y otro de baja conductividad (LC, por sus siglas en inglés). Para cada uno de estos suelos se utilizó una curva SWCC. Se utilizó una sola geometría del talud de análisis y un solo nivel freático. Se modelaron tres patrones de lluvia, retardado, normal y avanzado respectivamente, con datos recopilados en Singapur.

Uno de los resultados de este estudio se muestra en la figura 19, en la que se muestra el cambio de FS con el transcurso de la lluvia para los tres patrones de lluvia para un suelo LC. Se observa como el patrón de lluvia controla el FS durante el tiempo transcurrido de la lluvia y posterior a la lluvia.

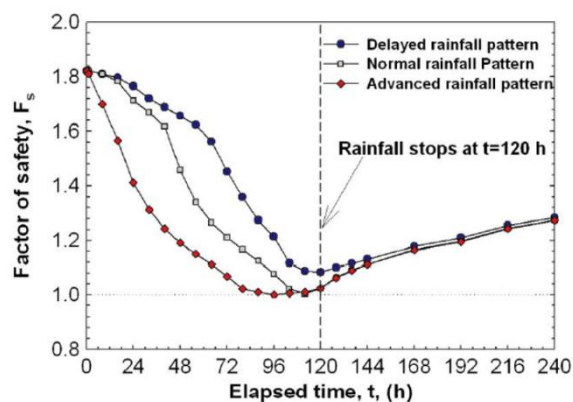


Figura 19. Variación del F.S. vs tiempo (h) suelo LC (Rahimi et al.,2011). Fuente: Rahimi et al. (2011)

Moreno, H. A., Vélez, M. V., Montoya, J. D., & Rhenals, R. L (2006). “La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: Análisis de su ocurrencia en las escalas interanuales , intraanual y diaria”.

Estudiaron la relación entre lluvias y deslizamientos en el departamento de Antioquia en los años 1929 a 1999. Se ubicaron en un mapa 405 deslizamientos posiblemente inducidos por lluvias en la región. Se apoyaron en escalas 1:10.000 y 1:25.000 del IGAC. El objetivo principal de este estudio era establecer una relación dinámica lluvia-suelo y avanzar en una aproximación matemática de este fenómeno. También se trata de establecer la relación con el fenómeno El Niño Oscilación del Sur, ENSO, en la ocurrencia de deslizamientos.

Se encontró que los deslizamientos han aumentado con el tiempo debido al crecimiento poblacional y avance de comunicaciones en Colombia. Por otra parte, se establecieron mayores deslizamientos en los periodos de La Niña en el departamento de Antioquia. Para periodos de El Niño se presentaron menor número de deslizamientos. Así, se determinó que en periodos húmedos los deslizamientos se incrementan en función de las lluvias ocurridas.

Hakim, F. & Bahsan, E (2017). “Parametric study on the effect of rainfall pattern to slope Stability”.

El estudio realizado muestra el efecto de los patrones de lluvia (avanzado, normal y retrasado) en el FS en suelos no saturados. Los datos de lluvias fueron recopilados entre los años 2014 y 2015. Se consideró la curva característica del suelo y la función permeabilidad, ambas relacionan la succión matricial del suelo.

En el primer escenario se realizó un análisis de flujo estable para obtener una condición inicial de la estabilidad del talud. Luego se realizó un análisis de flujo transitorio para cada patrón de lluvia.

El estudio encontró que para taludes con pendientes suaves el FS es menor con un patrón de lluvia avanzado. Para taludes con pendientes empinadas el FS es menor con un patrón de lluvia retrasado.

Kim, S. Chun, K. Kim, M. Catani, F. Choi, B & Seo, J (2020). “Effect of antecedent rainfall conditions and their variations on shallow landslide-triggering rainfall thresholds in South Korea”.

Para este estudio se recopilaron datos de lluvia de 613 deslizamientos y datos de 216 estaciones meteorológicas en Corea y cercanas a las ubicaciones de deslizamientos. Se encontró que el efecto de la lluvia antecedente disminuye cuando aumenta la duración de la lluvia desencadenante. Esto se da por el aumento en el contenido de agua en el suelo.

3. Metodología

3.1. Tipo de estudio.

Este trabajo es un estudio de tipo descriptivo-explicativo, el principal objetivo es buscar relaciones entre el FS de taludes en suelos lateríticos y lluvias antecedentes. Igualmente se realiza la caracterización de algunas de las propiedades geomecánicas de este tipo de suelos. Es explicativo al encontrar la relación entre el FS en taludes lateríticos y las lluvias antecedentes. En la tabla 4 se muestran las variables y constantes de estudio a considerar.

Variables	Unidad	Constantes	Unidad
Profundidad de la lluvia	mm	Pendiente de la curva característica suelo-agua	%/kPa
Intensidad de la lluvia	mm/h	Cohesión	kPa
Succión matricial	kPa	Ángulo de fricción	Grados
Presión de poros	kPa	Incremento de la resistencia al corte con el cambio de la succión matricial *	Grados
Conductividad hidráulica	m/s	Peso Unitario agua	kN/m ³
Tasa de flujo de agua	mm/h	Peso Unitario seco	kN/m ³
Contenido de agua volumétrica	%	Peso unitario total	kN/m ³
Contenido de agua	%	Peso Unitario saturado	kN/m ³
Altura del talud	m	* Para rangos pequeños de succión es constante, para rangos grandes de succión es una variable	
Pendiente del talud	m		
Factor de Seguridad	Adimensional		

Tabla 4. Principales variables y constantes del estudio a considerar. Fuente: Elaboración propia

Esta investigación se organizó mediante cinco fases. Estas fueron orientadas para dar cumplimiento a los objetivos específicos propuestos. En las fases se realizaron actividades como recopilación de información, consultas bibliográficas, realización de ensayos de laboratorio, organización de información y manejo de programas.

Fase 1: En esta fase se hace una recopilación de información de lluvias antecedentes en estaciones cercanas al sitio de referencia especificado y se selecciona la mejor información.

Fase 2: En esta fase se recopila información sobre los parámetros índice y geomecánicas de la laterita. De igual manera se realizaron ensayos de laboratorio para verificación de valores de propiedades geomecánicas del suelo.

Fase 3: En esta fase se recoge información de la curva característica y la función permeabilidad en los suelos lateríticos.

Fase 4: En esta fase se elaboran patrones de lluvia antecedente. Con la finalización de la primera fase se conforman patrones de lluvia, estos patrones se clasifican como retardado, normal y avanzado.

Fase 5: En la etapa final se determina la geometría de talud y se elaboran redes de flujo, igualmente se realiza el análisis de la variación del factor de seguridad en función del tiempo, teniendo en cuenta las fases anteriores, se usó el programa SEEP/w para los análisis de filtraciones y posteriormente slope/w para los análisis de estabilidad.

3.2. Localización del talud de referencia de estudio y muestra de la laterita.

Inicialmente y previo a las fases se determinó un talud de referencia. Esto con el fin de tener una guía geométrica de taludes y obtención de muestras de este tipo de suelos. Este sitio está ubicado en el sector de Miravalle en el municipio de Jamundí.

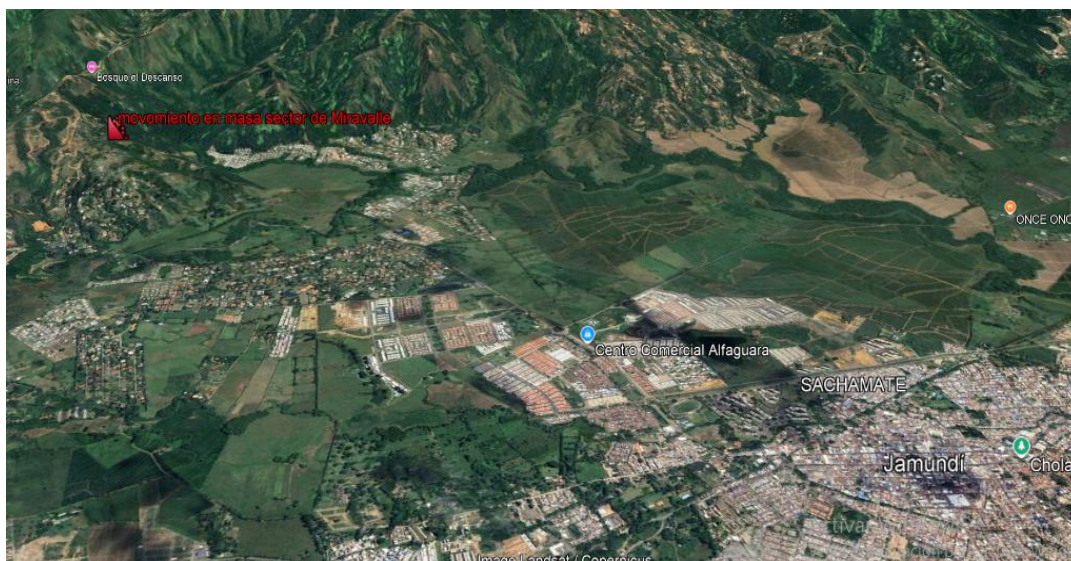


Figura 20. Talud de referencia de estudio Jamundí, (Valle del cauca). Fuente: Google Earth (2024)

La figura 20 muestra la zona urbana del municipio de Jamundí. Igualmente muestra la ubicación del movimiento en masa en el sector de Miravalle con coordenadas longitud - 76.59° y Latitud 3.25°. Este movimiento en masa está constituido por lateritas típicas de la Cordillera Occidental. En marzo del año 2021 se reactivaron grietas preexistentes en este talud, ubicado más exactamente en una vía interna del sector de Miravalle en el municipio de Jamundí. Esta será la laterita por considerar en este estudio.

Según el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT, 2017), Jamundí está ubicado al sur del departamento del Valle del Cauca a 12 km de la ciudad de Santiago de Cali . El área total es de 57.700 ha distribuidas en 43.070 ha en cordilleras y 14.630 ha de área plana. La temperatura promedio es de 24°C. Jamundí está constituido por zonas urbanas, suburbanas y rurales, tabla 5.

	POBLACION	SUP. AREA (Km²)	DENSIDAD Hab/Km²
Total	83573	577	144.8
Cabecera	57338	42	1303
Rural	26235	535	49.03

Tabla 5. Superficie y densidad de población, Municipio de Jamundí, (Valle del cauca).

Fuente: PBOT página Web (2017)

Sus corregimientos son: Ampudia, Bocas de Palo, Chagres, Guachinte, La Liberia, La Aventura, Paso de la Bolsa, Peón, Potrerito, Puente Vélez, Quinamayó, Robles, San Antonio, San Isidro, San Vicente, Timba, Villa Colombia, Villa la Paz, La Meseta, (PBOT, 2017). Esta zona se encuentra ubicada dentro del rango especificado en el capítulo 2.1.1

3.3. Fases del proyecto.

Para el desarrollo del proyecto se tuvieron en cuenta las cinco fases presentadas a continuación

3.3.1. Fase 1: Recopilación de información en pluviómetros o pluviógrafos del área origen de la laterita.

El objetivo principal de esta fase es recopilar información en la zona de estudio y obtener una base de datos reales de las precipitaciones

3.3.1.1. Consulta y recopilación de información

La recopilación de información se obtuvo del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM y de la Corporación Autónoma de Valle del Cauca, CVC. Inicialmente se observa las estaciones pluviográficas y pluviométricas más cercanas al sitio de estudio, ver figura 21

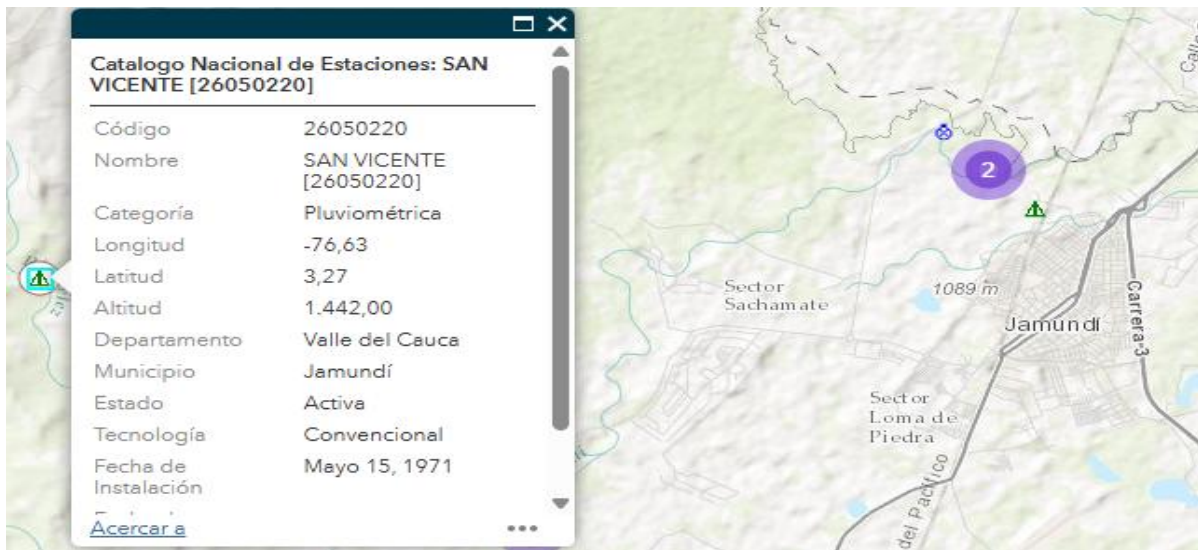


Figura 21. Previsualización de estación pluviométrica san Vicente (triángulo Verde círculo blanco) en la zona de estudio. Fuente: IDEAM (2025)

Como el punto de referencia es el movimiento en masa en el sector de Miravalle, se encontró que la estación pluviométrica más cercana en los registros de IDEAM y CVC, es la estación San Vicente. Con coordenadas longitud -76.63° , latitud 3.27° y una aproximación cercana de 4.3 km al movimiento en masa ubicado en el sector de Miravalle, como muestra la figura 22

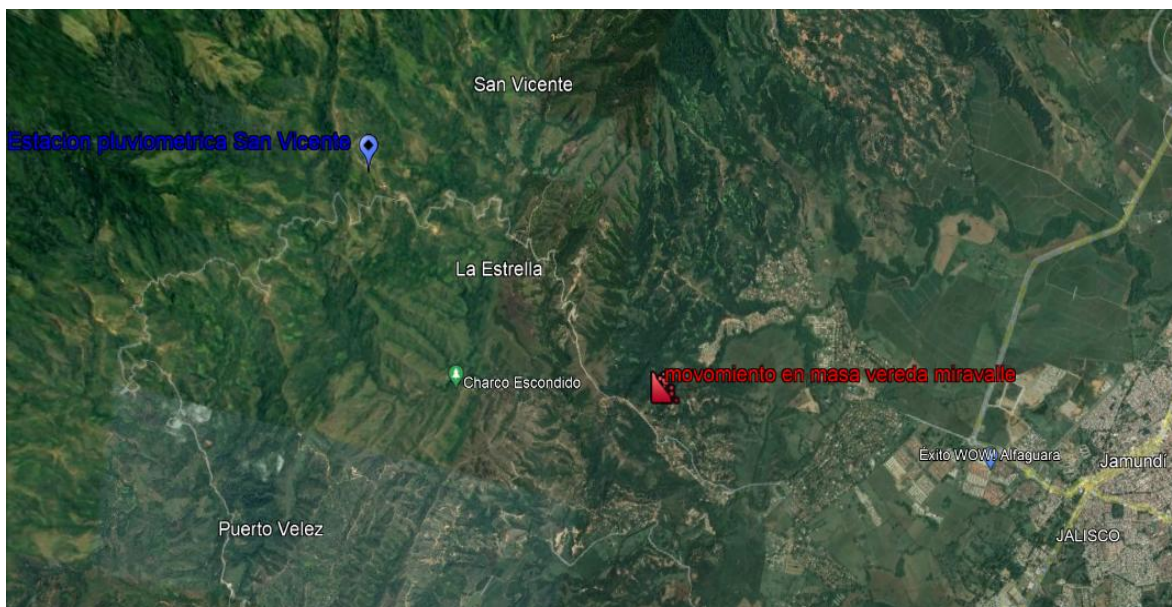


Figura 22. *Ubicación de la estación pluviométrica San Vicente, cercana al movimiento en masa en el sector de Miravalle. Fuente: Google Maps (2024)*

Con base en la información verídica de la estación San Vicente, se recopilaron las lluvias antecedentes ocurridas en la zona de estudio. Se recopiló información de cuatro meses antecedentes a la fecha del evento (reactivación de grietas) 14/03/2021.

En los datos obtenidos de la estación San Vicente se buscó relación entre la cantidad de lluvia antecedente en el estudio de Rahimi et al, (2011). Rahimi estableció una cantidad continua de 450 mm durante cinco días. En función de lo anterior, se organizó la información para encontrar precipitaciones de lluvias altas, estas precipitaciones se encontraron en el último mes a la fecha del evento (semanas 15, 16, 17 y 18), ver figura 23

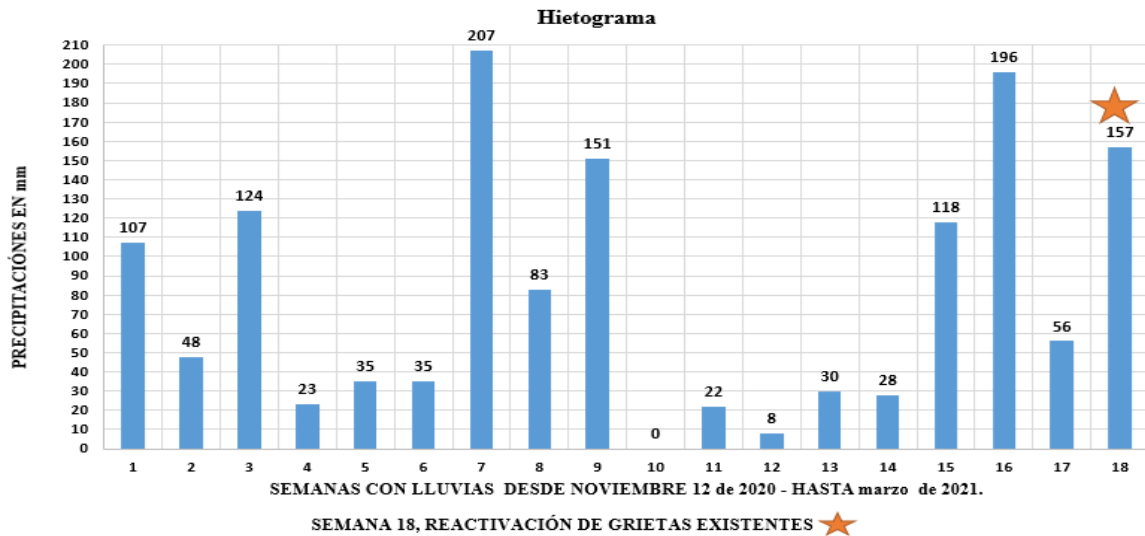


Figura 23. Lluvias antecedentes 18 semanas antes de la reactivación de las grietas. Datos obtenidos de la estación pluviométrica San Vicente CVC, ubicada a 4.3 km del movimiento en masa. Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.2. Selección de estación pluviométrica o pluviográfica.

La estación San Vicente tiene datos de sus coordenadas desactualizadas en la página de la CVC. Por este motivo fue necesario corregir dichas coordenadas con información obtenida del IDEAM, como se muestra en la figura 24.

Corporación Autónoma
Regional del Valle del Cauca

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA
Dirección Técnica Ambiental
Grupo Recursos Hídricos - Red de Monitoreo

FICHA DE ESTACIONES

DATOS ESTACION

Estación:	SAN VICENTE
Departamento:	Valle del Cauca
Municipio:	JAMUNDÍ
Cuenca:	Jamundi
Latitud:	361584.16 ● 1050137.33 ● 3.27
Longitud:	318890.71 ● 853301.28 ● -76.63
Altura (BM):	0.00
Código:	2622100103
Entidad:	CVC
Categoría:	PG
Fecha Inicio:	01/05/1971
Fecha Suspensión:	
Responsable:	San Vicente
Cantidad Decimales:	2
Abscisado:	N/A

CARACTERÍSTICAS MORFOLOGICAS

Perímetro de la Cuenca (Km):	
Longitud Cuenca Principal	
Longitud Total Corrientes	
Área de Drenaje (km²):	
Forma Gravelius:	
Densidad de Drenaje:	
Rata de Bifurcación:	
Altura Media (m.s.n.m):	
Pendiente Media:	
Perfil Vigente:	
Fecha Vigencia:	
Cero de Mira CVC:	
Cota BM CVC:	
Cero de Mira IGAC:	0,00
Fecha Cero Mira IGAC:	01/01/1900

Figura 24. Coordenadas corregidas estación San Vicente. Fuente: CVC (2023)

Igualmente se observó en registros del IDEAM, las fechas previas al acontecimiento del movimiento en masa y no hay registro de datos de precipitaciones. Por este motivo, los registros presentados en la CVC eran los ideales para tenerlos en cuenta en el presente

estudio. De esta manera se estableció la estación San Vicente con datos de la CVC, como la más apropiada para el estudio, datos de la figura 23.

3.3.2. Fase 2: Recopilación de información de parámetros Índice y Geomecánicas de la laterita

El objetivo en esta fase es recopilar información de los parámetros índice y geomecánicas del suelo mediante ensayos de laboratorio con normativa existente e información adicional encontrada en la zona de estudio.

3.3.2.1. Consulta y recolección de información de suelos lateríticos presentes en la zona.

Teniendo en cuenta la zona de estudio, se recolecta información básica con la ayuda de informes de la zona, en el sector de Miravalle. La zona está ubicada sobre el flanco oriental de la Cordillera Occidental, los taludes naturales en esta zona generalmente tienden a tener inclinaciones entre los 30° y 50°. Debido a la permeabilidad natural de los suelos presentes en vías de acceso, se han ocasionado deterioros erosivos. La pendiente crítica en este sitio es de 58° (inestabilidad de talud vía interna- parcelación colinas de Miravalle, 2011).

En el sitio del movimiento en masa del sector de Miravalle se presentan suelos como limos inorgánicos, de color café, rojo, amarillo y grises claros. Este tipo de suelos están ubicados en la zona alta y sobre la pendiente del talud (inestabilidad de talud vía interna- parcelación colinas de Miravalle (2011), ver figura 25.

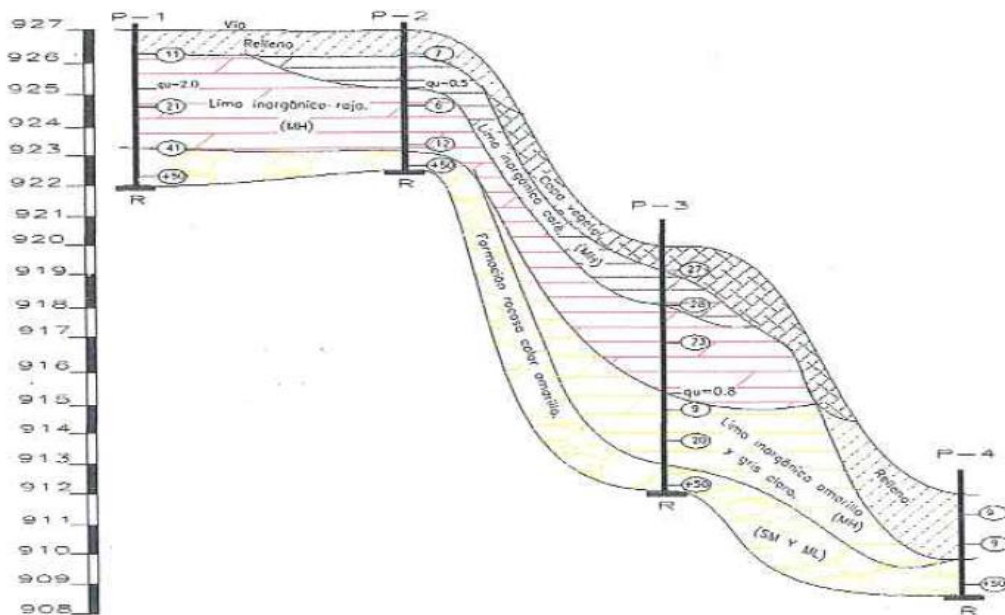


Figura 25. Perfil estratigráfico de perforación deducido de la zona. Fuente: inestabilidad de talud vía interna- parcelación colinas de Miravalle (2011)

Se encontraron registros de resultados de ensayos. Estos ensayos otorgan información importante de las características geomecánicas del suelo ubicados en la zona de la corona del talud y pendiente del talud, como muestra la figura 26.

PERFORACIÓN	MUESTRA	PROFUNDIDAD (mts)	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO % QUE PASA EN PESO			LÍMITES DE ATTERBERG			CLASIFIC U.S.C.	HUMEDAD NATURAL %	PESO UNITARIO ton/m ³	q _u Kg/cm ²	P _e Kg/cm ²	N golpes/pie
			T _{máx}	No 4	No 200	L.L.	L.P.	I.P.						
P-1	M-1	0.50 - 1.00				84.30	48.20	36.10	MH	37.10				11
	S-1	1.50 - 2.00				79.00	45.90	33.10	MH	36.80	1.75	2.00		—
	M-2	3.00 - 3.50				52.90	31.00	21.90	MH	26.70				41
	M-3	4.50 - 5.00	1/2"	70.40	25.80	NP	NP	NP	SM	15.90				+50
P-2	M-1	0.50 - 1.00				64.80	37.70	27.10	MH	28.30				7
	S-1	1.50 - 2.00				61.10	43.80	37.30	MH	40.00	1.77	0.50		—
	M-2	3.00 - 3.50				72.00	43.90	28.10	MH	39.50				12
	M-3	4.00 - 4.50	1/2"	65.40	21.50	NP	NP	NP	SM	14.50				+50
P-3	M-1	0.50 - 1.00				78.50	44.20	34.30	MH	30.90				27
	M-2	1.50 - 2.00				97.10	51.40	45.70	MH	41.00				28
	M-3	3.00 - 3.50				68.60	42.50	26.10	MH	40.00				23
	S-1	4.50 - 5.00				52.40	31.20	21.20	MH	21.70	1.71	0.81		—
	M-4	6.00 - 6.50				62.40	31.20	31.20	CH-MH	30.60				20
	M-5	7.50 - 8.00				61.70	39.10	22.60	MH	31.10				+50
P-4	M-1	0.50 - 1.00				69.70	43.30	26.40	MH	54.50				9
	M-2	1.50 - 2.00				76.40	47.30	29.10	MH	44.80				9
	M-3	3.00 - 3.50				49.90	33.70	16.20	ML	20.10				+50

Figura 26. Características geomecánicas del suelo zona de la corona del talud y pendiente del talud. Fuente: inestabilidad de talud vía interna- parcelación colinas de Miravalle (2011)

Teniendo en cuenta esta información y procesos de estabilidad que se desarrollaban en la zona, se verificó información en la parte alta en la corona del talud. En esta zona se encontraron suelos relacionados en la estratigrafía de la figura 26, se observa una pequeña capa de relleno de material granular y suelo color rojo con apariencia limosa como se muestran a continuación en la figura 27.



Figura 27. Registro fotográfico. Verificación de información en la parte alta del talud.

Fuente: Diaz (2022)

Teniendo en cuenta la información relevante sobre la pendiente y la zona alta de la corona del talud, se decidió tomar una muestra en la zona baja del talud. La muestra de suelo fue tomada por medio de la normativa especificada en la norma I.N.V.E 104. Toma de muestras de suelo en superficie, ver figura 28.



Figura 28. Registro fotográfico. Recolección de muestra inalterada. Fuente: Diaz (2023).

Con la muestra obtenida, se procedió a obtener datos relevantes para el estudio de este proyecto, se usaron las normas establecidas por instituto nacional de vías, I.N.V.E 2013. Se desarrollan ensayos correspondientes para obtener las características geomecánicas del suelo. Entre estas se encuentran la humedad natural, los límites de consistencia para lograr clasificar el tipo de suelo, igualmente propiedades geomecánicas del suelo como la Resistencia al Corte del Suelo, Ángulo de Fricción Interna y esfuerzo normal efectivo. Estos valores son relevantes para el estudio de análisis de estabilidad de taludes.

En la Tabla 6 se presentan los ensayos realizados de acuerdo con la norma I.N.V.E 2013 usada.

Norma I.N.V.E 2013	
Norma I.N.V.E 104	Toma de muestra inalterada en superficie.
Norma I.N.V.E 106	Preparación de muestras de suelo por vía seca para análisis granulométrico y determinación de las constantes físicas.
Norma I.N.V.E 125	determinación del límite líquido en los suelos.
Norma I.N.V.E 126	Límite plástico e índice de plasticidad en suelos.

Norma I.N.V.E 2013	
Norma I.N.V.E 104	Toma de muestra inalterada en superficie.
Norma I.N.V.E 122	Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y muestras de suelo - agregado.
Norma I.N.V.E 154	Ensayo de corte directo en condición consolidada drenada.

Tabla 6. Normativa existente utilizada para realización de ensayos de laboratorio. Fuente: *Elaboración propia*

A continuación, se muestran algunas de las actividades realizadas durante el desarrollo de ensayos de laboratorios. Estos fueron realizados en el laboratorio de suelos de la facultad de ingeniería civil en la universidad del valle. Igualmente se muestra información detallada en el capítulo siete (anexos), ver figuras 29, 30 y 31.



Figura 29. Registro fotográfico. Preparación de muestras para la realización de los ensayos de humedad natural y límites de consistencia. Fuente: Diaz (2023)



Figura 30. Registro fotográfico. Izquierda. Preparación para Gradación. Derecha Realización Límites de consistencia. Fuente: Diaz (2023)



Figura 31. Registro fotográfico. Izquierda gradación suelo, Derecha Probetas para corte directo. Fuente: Diaz (2023)

Finalmente, y con información adicional de fuentes bibliográficas, se recolecta la información base en este tipo de suelos. Las propiedades más importantes para el análisis de la influencia de las lluvias antecedentes en la estabilidad de taludes en un suelo laterítico de Jamundí (Valle del Cauca) se presentan a continuación en la tabla 7.

PROPIEDADES GEOMECCNICAS DEL SUELO					
Autores	Angulo de Fricción Interna ϕ grados	peso unitario γ (Kn/m ³)	Cohesión kPa	Clasificación	Permeabilidad m/s
Obtenidos en sitio, parte alta y sobre pendiente de talud. informe Miravalle (2011)	29	17.5	93.6	Predomina los limos de alta plasticidad	—
Obtenidos en sitio , parte pie de talud laboratorio Univalle (2023)	29	18.4	26.7	Limo baja plasticidad. arcilla plasticidad media.	—
Clay materials used in constructions. Charman (1988).	-	[9 - 23]	-	-	—
Clay materials used in constructions. Bell (2000).	[27 - 57]	[15.2 -17.5] seco	[48 - 345]	Tiende a abarcar la línea A. baja y alta plasticidad	—
Clay materials used in constructions. Mitchell y Sitar (1982).	[23 - 33]	—	[0-210]	—	—
Clay materials used in constructions. Hoobs et al (1992).	[19-41]	—	[2-39]	arcillas rojas en indonesia	—
Clay materials used in constructions. Hoobs et al (1992).	[12-37]	—	[0-55]	arcillas rojas en Kenia	—
Clay materials used in constructions. Vargas (1974).	—	—	—	—	10 e-4
Saldarriaga et al (2013).	10	—	30	limo de alta plasticidad (MH)	—
Miguel et al (2012).	—	11.8	—	—	10 e-5

Tabla 7. Datos obtenidos en laboratorio y de fuentes bibliográficas. Fuente: Elaboración propia.

3.3.3. Fase 3: Obtener la curva característica y función permeabilidad en los suelos lateríticos

El objetivo en esta fase es obtener la curva característica y la función permeabilidad de la laterita.

3.3.3.1. Recopilación existente de curvas características del suelo y función permeabilidad de laterita.

Para Saldarriaga et al. (2013) en el artículo de investigación “Caracterización Geotécnica de un suelo tropical laterítico” nombra a este tipo de suelos con propiedades ingenieriles. Tiene como referencia al municipio de Girardota en Antioquia. El estudio se centra en la caracterización de estratos superiores del perfil en este tipo de suelos.

Saldarriaga (2013) estudia la succión matricial nombrada en el capítulo 2.1.3. Hace recomendaciones de dos ecuaciones para el comportamiento de la succión y estas están en función de la humedad (w) de la siguiente manera.

$$\text{Si } w > 47\% \text{ se deberá usar } S_e(\text{kPa}) = 10^{(6.05 - 2.48 \log w)} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$\text{Si } w \leq 47\% \text{ se deberá usar } S_e(\text{kPa}) = 10^{(4.84 - 2.48 \log w)} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

S_e : es la succión matricial

w: es la humedad

Por otra parte, Yamusa Bello et al, (2019), recopilaron información sobre curvas características en suelos de autores reconocidos como Brooks y Corey (1966), Van Genuchten (1980), Fredlund y Xing (1994). Seguidamente los autores conformaron probetas de suelo laterítico compactada en diferentes estados de humedad. Mediante el método de placas de presión, se obtuvieron las curvas características de cada probeta. Teniendo en cuenta el programa “SWCR fit” realizaron ajustes de las curvas lineales. Finalmente determinaron el suelo laterítico probado que mejor se ajusta a las curvas investigadas por los autores reconocidos, ver tablas 8, 9 y 10.

Autor	Condición	Broks y Corey	parámetros	Conclusión
Yasuma bello et al (2019)	Seco	$S_e = \frac{hb^{-\lambda}}{h}$, si $h > hb$ $S_e = 1$, si $h \leq hb$	$\Theta_s = 0.456$ $\Theta_r = 1.32e-07$ $hb = 20.110$ $\lambda = 0.402$	Las curvas características medidas se adecuaron a los modelos, pero se acercó mucho más a Fredlung y Xing.
	Optimo	$S_e = \frac{hb^{-\lambda}}{h}$, si $h > hb$ $S_e = 1$, si $h \leq hb$	$\Theta_s = 0.478$ $\Theta_r = 0.351$ $hb = 7.249$ $\lambda = 0.157$	
	Húmedo	$S_e = \frac{hb^{-\lambda}}{h}$, si $h > hb$ $S_e = 1$, si $h \leq hb$	$\Theta_s = 0.499$ $\Theta_r = 0.359$ $hb = 6.967$ $\lambda = 0.1738$	

Tabla 8. Principales parámetros relacionados con ecuaciones de succión, Broks y Corey(1966). Fuente: Yasuma bello et al. (2019)

Autor	Condición	Van Genuchten	parámetros	Conclusión
Yasuma bello et al (2019)	Seco	$S_e = [\frac{1}{1+\alpha h^n}]^m$, $m = 1 - \frac{1}{n}$	$\Theta_s = 0.455$ $\Theta_r = 5.88 e-06$ $\alpha = 0.011$ $n = 1.067$	Las curvas características medidas se adecuaron a los modelos, pero se acercó mucho más a Fredlung y Xing.
	Optimo	$S_e = [\frac{1}{1+\alpha h^n}]^m$, $m = 1 - \frac{1}{n}$	$\Theta_s = 0.47836$ $\Theta_r = 2.45e-05$ $\alpha = 0.688$ $n = 1.039$	
	Húmedo	$S_e = [\frac{1}{1+\alpha h^n}]^m$, $m = 1 - \frac{1}{n}$	$\Theta_s = 0.49845$ $\Theta_r = 2.26e-05$ $\alpha = 0.069$ $n = 1.045$	

Tabla 9. Principales parámetros relacionados con ecuaciones de succión, Van Genuchten (1966). Fuente: Yasuma bello et al. (2019)

Autor	Condición	Fredlung y Xing	parámetros	Conclusión
Yasuma bello et al (2019)	Seco	$S_e = [\frac{1}{\ln[e+(\frac{h}{a})^n]}]^m$	$\Theta_s = 0.46428$ $\Theta_r = 2.3948e-06$ $a = 2.182e+05$ $m = 5.5681$ $n = 0.43480$	Las curvas características medidas se adecuaron a los modelos, pero

Autor	Condición	Frendlung y Xing	parámetros	Conclusión
	Optimo	$S_e = \left[\frac{1}{\ln[e + (\frac{h}{a})^n]} \right]^m$	$\Theta_s = 0.48710$ $\Theta_r = 0.32825$ $a = 7147.4$ $m = 5.2266$ $n = 0.399$	se acercó mucho más a Frendlung y Xing.
	Húmedo	$S_e = \left[\frac{1}{\ln[e + (\frac{h}{a})^n]} \right]^m$	$\Theta_s = 0.51639$ $\Theta_r = 3.524e-06$ $a = 3.308e+05$ $m = 3.639$ $n = 0.289$	

Tabla 10. Principales parámetros relacionados con ecuaciones de succión, Frendlung y Xing (1994), Fuente: Yasuma bello et al. (2019)

Función permeabilidad: Según la guía de Geo-slope internacional Ltd. (2012), la capacidad del agua para fluir en el suelo depende de la cantidad de agua que está presente en el suelo. Y se puede representar mediante la función permeabilidad. Medir esta función real emplea tiempo y costos. Por esta razón la función permeabilidad también se puede determinar mediante la curva característica del suelo. Seep/w contiene tres modelos de estimación. A continuación, se presenta el Método de Fred Lund et al, 1994.

$$k_w = k_s * \frac{\sum_{i=j}^n \left[\frac{\Theta(e^y) - \Theta(\psi)}{e^{yi}} \right] \Theta'(e^{yi})}{\sum_{i=j}^n \left[\frac{\Theta(e^y) - \Theta_s}{e^{yi}} \right] \Theta'(e^{yi})} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

k_w : es la conductividad calculada para para un contenido de agua especificado en m/s.

k_s : es la conductividad saturada en m/s.

e: es el numero = 2.7182.

y :es una variable que representa el logaritmo de la presión de poro negativa.

i :es el intervalo de j a N.

j:es la menor presión de poro negativa que será descrita por la función final.

n: es la máxima presión de poro que será descrita en la función final.

Θ_s : es el contenido volumétrico de agua.

Θ' es la primera derivada de la siguiente ecuación.

$$\Theta = C(\psi) \frac{\Theta_s}{(\ln(e + (\frac{\psi}{\alpha})^n))^m} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

α , n , m : son los parámetros mencionados en el capítulo 2.1.2.3 ecuación de Fred Lund and xing.

$C(\psi)$: es una función de corrección definida como:

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{c_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{1000000}{c_r}\right)} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde:

c_r : es una constante relacionada con la succión matricial correspondiente al contenido de agua residual con valor típico de 1500 KPa. El valor de 1000.000 corresponde al valor de la succión matricial donde no queda humedad en el suelo.

Teniendo en cuenta la información anterior se establece que las ecuaciones con el mejor ajuste para la curva característica en suelos lateríticos son los modelos de Fred Lund and xing (1994), y Van Genuchten (1996), la información en la bibliografía anterior será tenida en cuenta para la modelación en la fase cinco.

3.3.4. Fase 4: Elaboración de patrones de lluvia antecedente

El objetivo de esta fase es conformar patrones de lluvia antecedentes a partir de la información recopilada en la fase 1.

3.3.4.1. Análisis de datos recopilados en la base de datos de lluvias antecedentes.

Teniendo en cuenta la base de datos con información de la fecha, profundidad de la lluvia, y tiempo de muestreo de la información recopilada en la fase 1, se elaboraron hietogramas con patrones de lluvia retardado, normal y avanzado.

Elaboración de patrones de lluvia

Para la elaboración de los patrones de lluvia se tuvo en cuenta la cantidad en mm trabajada por Rahimi et al. (2011). El autor establece una cantidad de 450 mm los cuales se distribuyeron en diferentes patrones en un periodo de cinco días. Se estableció una medida

aproximada a la de Rahimi con datos reales obtenidos en la fase 1. Igualmente se tuvo en cuenta la fecha de reactivación de las grietas.

Para la recopilación de datos se consideraron las precipitaciones del mes anterior a la reactivación de las grietas. Como referencia para el inicio del registro de las lluvias se tomó el 14 de febrero de 2021, tal como se presenta en la tabla 11.

Precipitación diaria máximos en mm										
Año 2020				Año 2021						
DI A	OCTUBR E	NOVIEMBR E	DICIEMBR E	ENER O	FEBRER O	MARZ O	ABRI L	MAY O	JUNI O	JULI O
1		0	38	0	8	92	0	58	1	0
2		0	6	0	0	17	24	1	2	0
3		0	0	12	0	18	29	6	1	0
4		4	0	43	0	11	9	0	6	0
5		0	9	24	0	0	22	0	0	0
6		0	0	74	0	0	1	0	45	0
7		0	0	0	0	3	8	44	1	0
8		0	8	0	9	5	0	1	12	6
9		0	0	0	21	19	1	20	5	2
10		9	4	14	0	39	0	0	0	2
11		21	16	63	0	18	0	21	40	0
12	0	0	8	0	8	42	0	0	23	0
13	4	65	0	0	14	11	0	14	3	0
14	0	4	0	0	6	18	0	0	47	4
15	0	7	7	0	0	22	0		9	
16	0	19	0	0	0	7	1	25	0	
17	18	0	0	0	22	24	0	11	0	
18	44	12	0	0	62	8	56	0	0	
19	6	20	5	0	8	14	30	0	0	
20	0	24	30	0	11	12	22	0	23	
21	0	0	0	0	6	18	0	2	0	
22	0	0	0	7	9	21	0	0	5	
23	9	0	0	15	0	8	11	6	8	
24	0	0	39	0	6	6	0	0	4	
25	0	4	99	0	21	19	27	13	0	
26	0	59	16	0	23	4	13	10	1	
27	4	12	15	0	18	8		26	1	
28	7	0	12	0	19	0	16	15	0	
29	9	15	26	0		0	5	8	0	
30	16	0	0	0		0	6		30	
31	39		4	0		0		49		

Tabla 11. Cantidad en mm correspondientes a las lluvias un mes antes de la reactivación de grietas en el sitio, (zona azul). Fuente: Elaboración propia

Con los datos recopilados en un mes, se estableció una cantidad de 312 mm acumulados durante 15 días de lluvia, ver tabla 12.

Precipitaciones en mm último mes de lluvias antes de reactivación de las grietas		
día	Precipitación en mm	Acumulado mm
1	6	174
2	0	
3	0	
4	22	
5	62	
6	8	
7	11	
8	6	
9	9	
10	0	
11	6	
12	21	
13	23	
14	18	312
15	19	
16	92	
17	17	
18	18	
19	11	
20	0	
21	0	
22	3	
23	5	
24	19	
25	39	
26	18	
27	42	
28	11	

Tabla 12. Cantidad en mm correspondientes a las lluvias 15 días antes de la reactivación de grietas, 312 mm. Fuente: Elaboración propia

Posteriormente y teniendo como referencia la cantidad en días del estudio de Rahimi et al., (2011). Se conformaron los patrones de lluvia, como se muestra a continuación.

Para el total de 312 mm se distribuyeron de acuerdo con lo mencionado en el capítulo 2.1.8 La distribución contempla patrones de lluvia retardado, avanzado y normal, ver tabla 13 y figura 32.

día	Cantidad distribuidos 312 mm	retardado	avanzado	normal
1	31.2	31.2	93.6	31.2
2	41.6	41.6	83.2	62.4
3	62.4	62.4	62.4	93.6
4	83.2	83.2	41.6	83.2
5	93.6	93.6	31.2	41.6
Total	312 mm			

Tabla 13. Distribución de 312 mm en 5 días. Patrones de lluvia retardado, avanzado, normal. Fuente: Elaboración propia

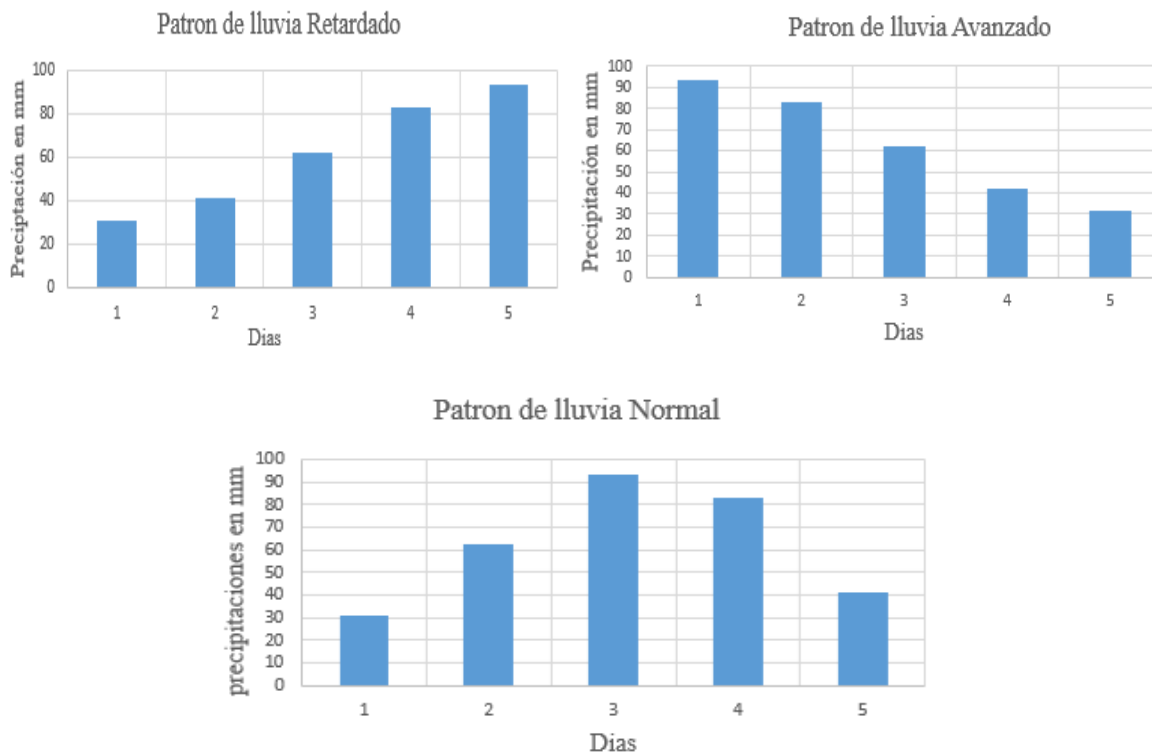


Figura 32. Patrones de lluvia elaborados, patrón retardado, avanzado y normal. Fuente: Elaboración propia

Para manejo de los programas de estabilidad y filtraciones se procedió a hacer las conversiones de unidades de profundidad (mm) a intensidad ($\frac{m^3}{s * m^2}$), tabla 14 y figura 33.

día	312 mm en 5 días convertidos a intensidades($\frac{m^3}{s * m^2}$)		
	retardado	avanzado	normal
1	3.61E-07	1.08E-06	3.61E-07
2	4.81E-07	9.63E-07	7.22E-07
3	7.22E-07	7.22E-07	1.08E-06
4	9.63E-07	4.81E-07	9.63E-07
5	1.08E-06	3.61E-07	4.81E-07
—	3.611E-06 $\frac{m^3}{s * m^2}$		

Tabla 14. Distribución de 312 mm equivalentes a $3.61 \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{s * m^2}$ en cinco días. Patrones de lluvia retardado, avanzado, normal. Fuente: Elaboración propia

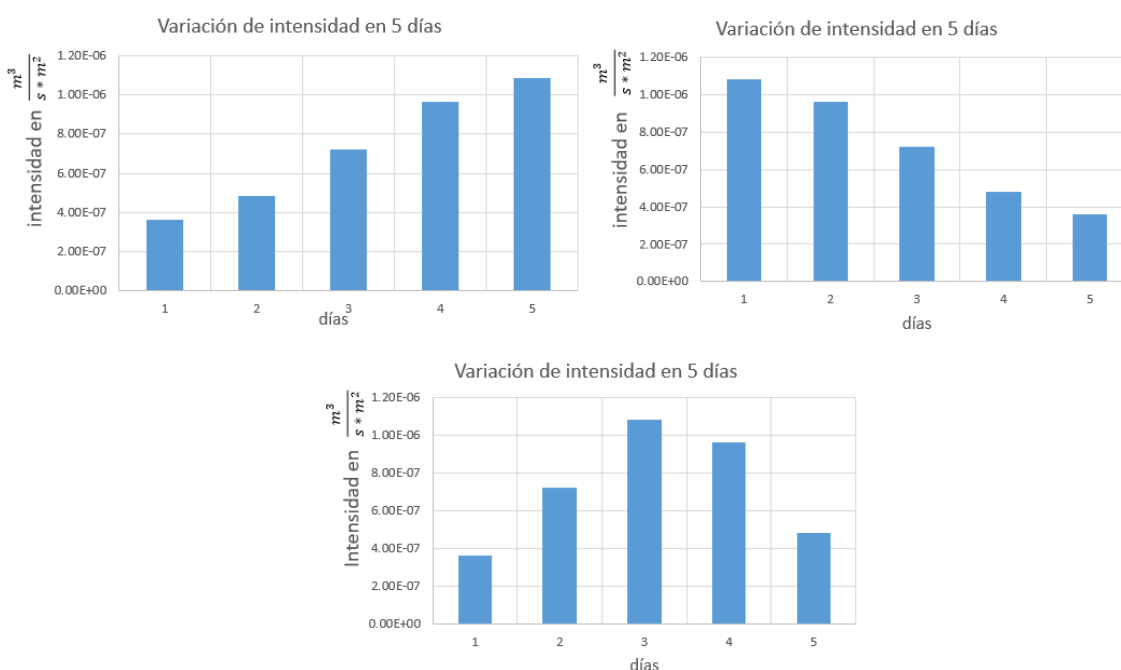


Figura 33. Patrones de lluvia elaborados para una intensidad de $3.61 \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{s * m^2}$, patrones de lluvia retardado, avanzado y normal respectivamente. Fuente: Elaboración propia

Se procedió a tener una cantidad opcional de precipitación equivalente a 624 mm y 1248 mm, esto debido a lo mencionado en el capítulo 2.1.8.2 en donde se relaciona diferentes factores de movimientos en masa, los movimientos en masa están determinados por diferentes factores desencadenantes y condicionantes, entre ellos diferentes precipitaciones.

Se procedió igualmente a convertir las unidades de precipitación (mm) a intensidades $\frac{m^3}{s * m^2}$ para estas nuevas cantidades, ver tablas 15 y 16. y figuras 34 y 35.

día	624 mm en 5 días convertidos a intensidades $7.22\text{e-}06 \frac{\text{m}^3}{\text{s} * \text{m}^2}$		
	retardado	avanzado	normal
1	7.22E-07	2.17E-06	7.22E-07
2	9.63E-07	1.93E-06	1.44E-06
3	1.44E-06	1.44E-06	2.17E-06
4	1.93E-06	9.63E-07	1.93E-06
5	2.17E-06	7.22E-07	9.63E-07
—	$7.22\text{E-}06 \frac{\text{m}^3}{\text{s} * \text{m}^2}$		

Tabla 15. Distribución de 624 mm equivalentes a $7.22\text{E-}06 \frac{\text{m}^3}{\text{s} * \text{m}^2}$ en 5 días. Patrones de lluvia retardado, avanzado, normal. Fuente: Elaboración propia

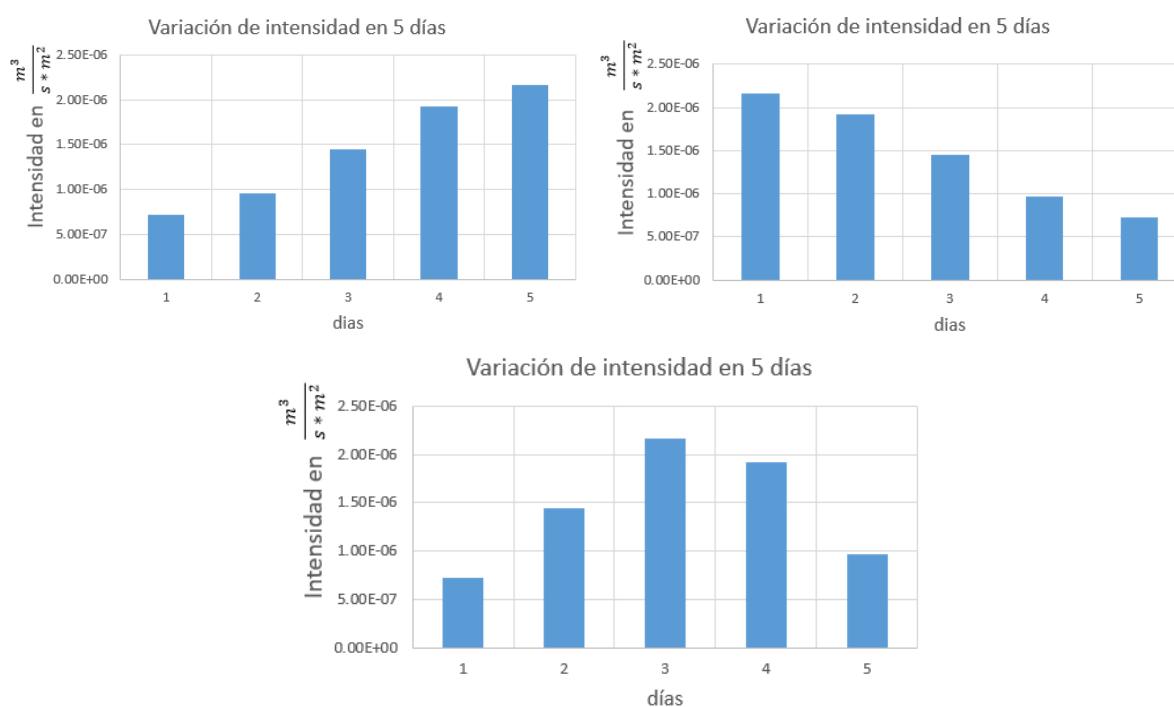


Figura 34. Patrones de lluvia elaborados para una intensidad de $7.22\text{e-}06 \frac{\text{m}^3}{\text{s} * \text{m}^2}$, Patrón retardado, avanzado y normal respectivamente. Fuente: Elaboración propia

día	1248 mm en 5 días convertidos a intensidades $\frac{m^3}{s * m^2}$		
	retardado	avanzado	normal
1	1.44E-06	4.33E-06	1.44E-06
2	1.93E-06	3.85E-06	2.89E-06
3	2.89E-06	2.89E-06	4.33E-06
4	3.85E-06	1.93E-06	3.85E-06
5	4.33E-06	1.44E-06	1.93E-06
—	$1.44E-05 \frac{m^3}{s * m^2}$		

Tabla 16. Distribución de 1248 mm equivalentes a $1.44E-05 \frac{m^3}{s * m^2}$ en 5 días. Patrones de lluvia retardado, avanzado y normal respectivamente. Fuente: Elaboración propia

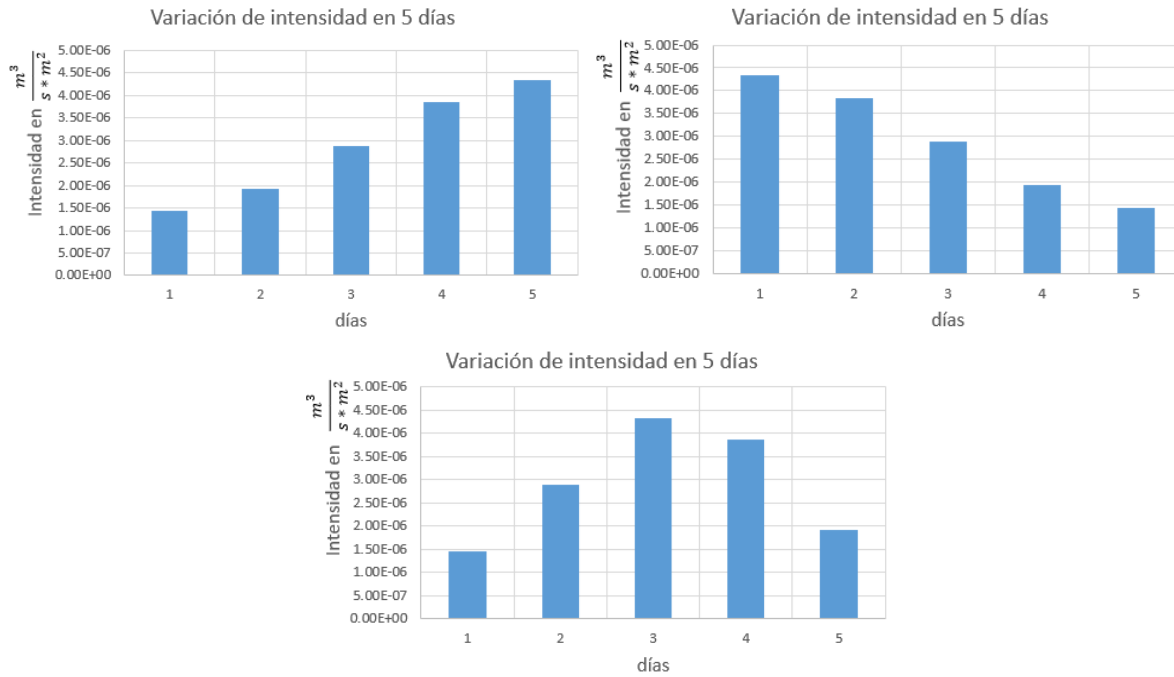


Figura 35. Patrones de lluvia elaborados para una intensidad de $1.44E-05 \frac{m^3}{s * m^2}$, Patrón retardado, avanzado y normal respectivamente. Fuente: Elaboración propia

Estos serán los patrones de lluvia referencia para el análisis de la influencia de las lluvias antecedentes en la estabilidad de taludes en un suelo laterítico de Jamundí (Valle del Cauca)

3.3.5. Fase 5: Elaboración de redes de flujo y análisis de la variación del factor de seguridad en función del tiempo, teniendo en cuenta los patrones de lluvia establecidos.

El objetivo en esta fase es determinar el comportamiento del factor de seguridad debido a la influencia de lluvias antecedentes en la zona de estudio. Se usará el software comercial GEOESTUDIO (www.geoslope.com).

3.3.5.1. Determinación de los taludes a modelar.

De acuerdo con la información preliminar de la fase dos y teniendo como referencia los datos del perfil estratigráfico. Se determinó el ángulo de inclinación del talud. Igualmente se tuvo en cuenta las referencias establecidas por Rahimi et al, 2011. Rahimi incorpora el nivel freático a 2 m de profundidad y con ángulo de inclinación de 5°. Datos usados generalmente en taludes con inclinaciones de gran extensión. Para nuestro caso y teniendo en cuenta una extensión pequeña, se maneja un nivel freático a 10 m, horizontal.

Para la zona de estudio se estableció un Ángulo crítico de inclinación de 60°. En la zona de estudio se presentan generalmente pendientes con ángulo de inclinación cercanos a este valor.

Para la geometría del talud se tuvo en cuenta las pendientes críticas y las dimensiones aproximadas de la zona de referencia, de esta manera se tomaron las dimensiones y se aproximaron a números enteros. Se definió una altura de 15 m y una dimensión vertical de 10 m como se muestra en la figura 36.

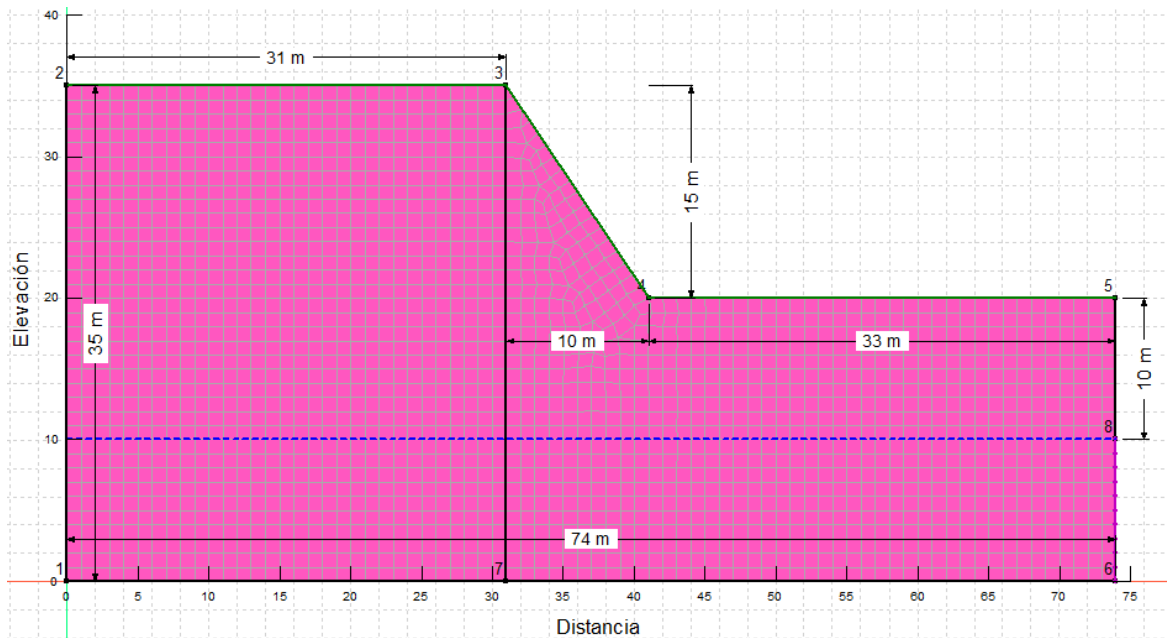


Figura 36. Modelo geométrico del talud a utilizar. Fuente: Elaboración propia

3.3.5.2. Determinación de las redes de flujo

En la determinación de las redes de flujo se estableció un suelo laterítico con propiedades de la función permeabilidad y una curva característica del suelo establecidas en la fase tres. Con los datos que se muestran a continuación, ver figura 37 y 38.

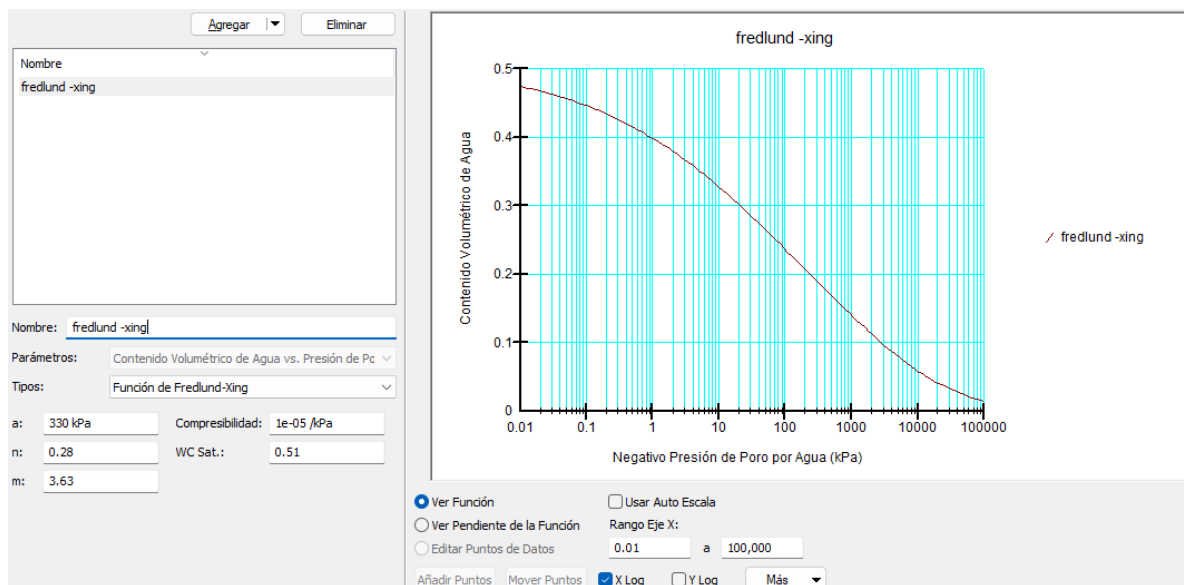


Figura 37. Curva característica del suelo laterítico utilizada Fredlund y Xing (1994).

Fuente: Elaboración propia

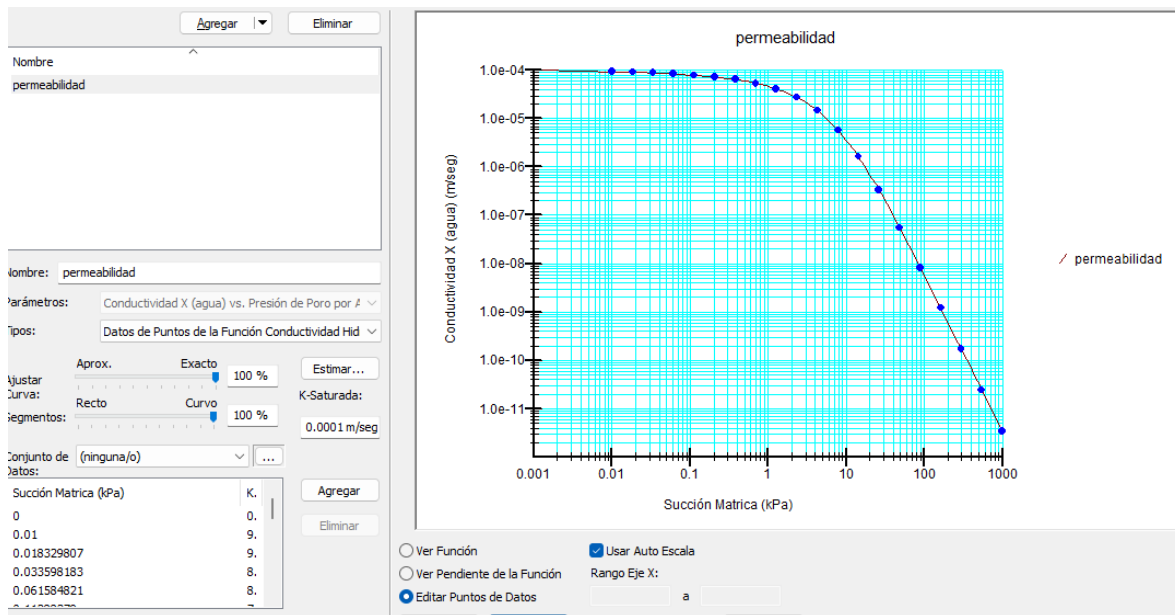


Figura 38. *Función permeabilidad del suelo laterítico a usar . Fuente: Elaboración propia.*

Condiciones de frontera o de borde

Se establecieron condiciones de frontera para el modelo, las condiciones de frontera controlan las condiciones en los límites. La variación de las cabezas hidráulicas es determinante para la generación del flujo. Estas condiciones de frontera están representadas por medio de los colores verde, naranja y azul y corresponden al flujo ocasionado para cada patron de lluvia. El color morado representa la cabeza total generada por el nivel freatico, ver figura 39.

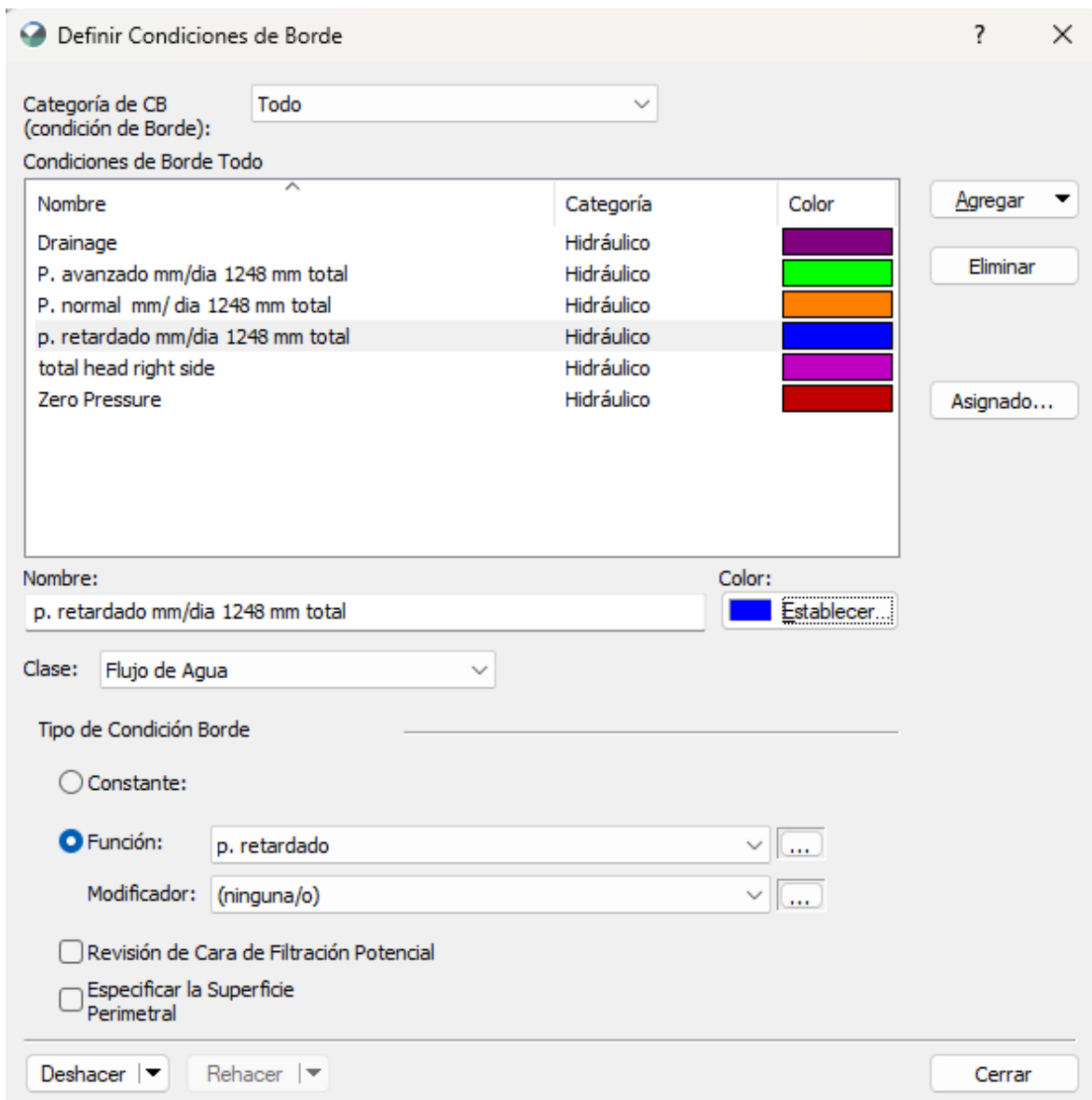


Figura 39. Incorporación de condiciones de frontera para análisis de estabilidad. Fuente :
Elaboración propia

A continuación, se insertaron los patrones de lluvia formados en la fase cuatro. Estos patrones fueron los establecidos como patrón avanzado de color verde, patrón retardado de color azul y patrón normal de color naranja. Los datos fueron incorporados al programa seep/ ver figura 40, 41 y 42.

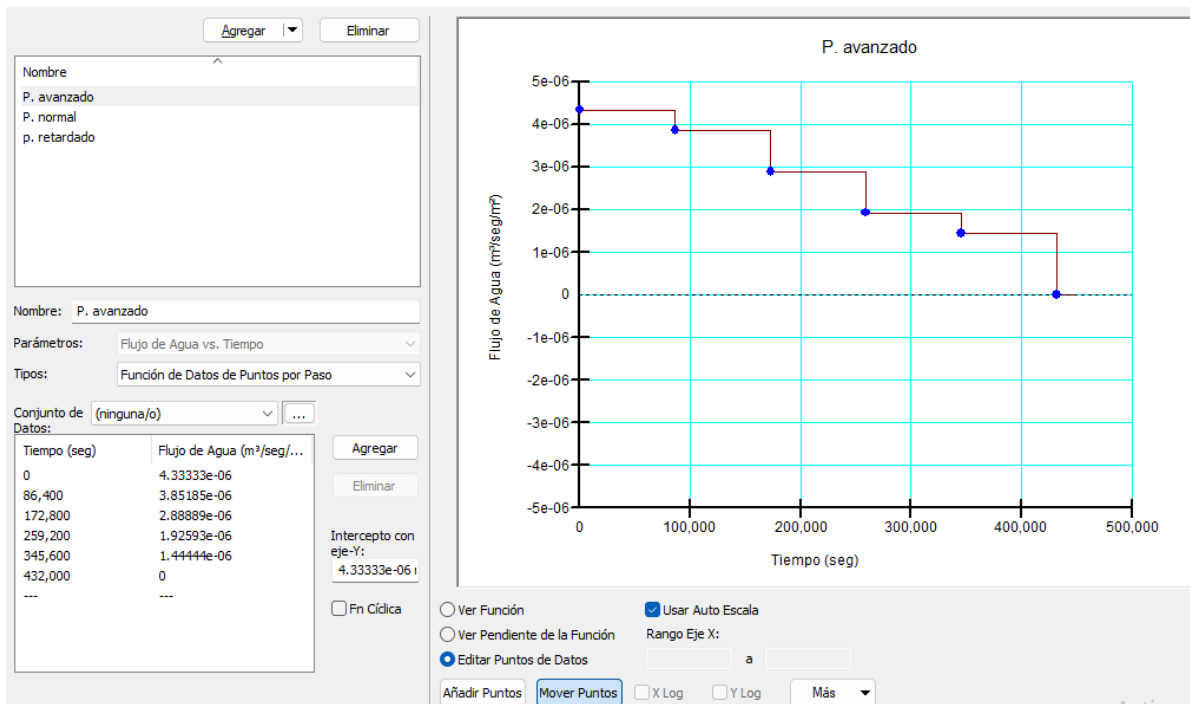


Figura 40. Incorporación de datos, patrón de lluvia Avanzado 1248 mm . Fuente:
Elaboración propia

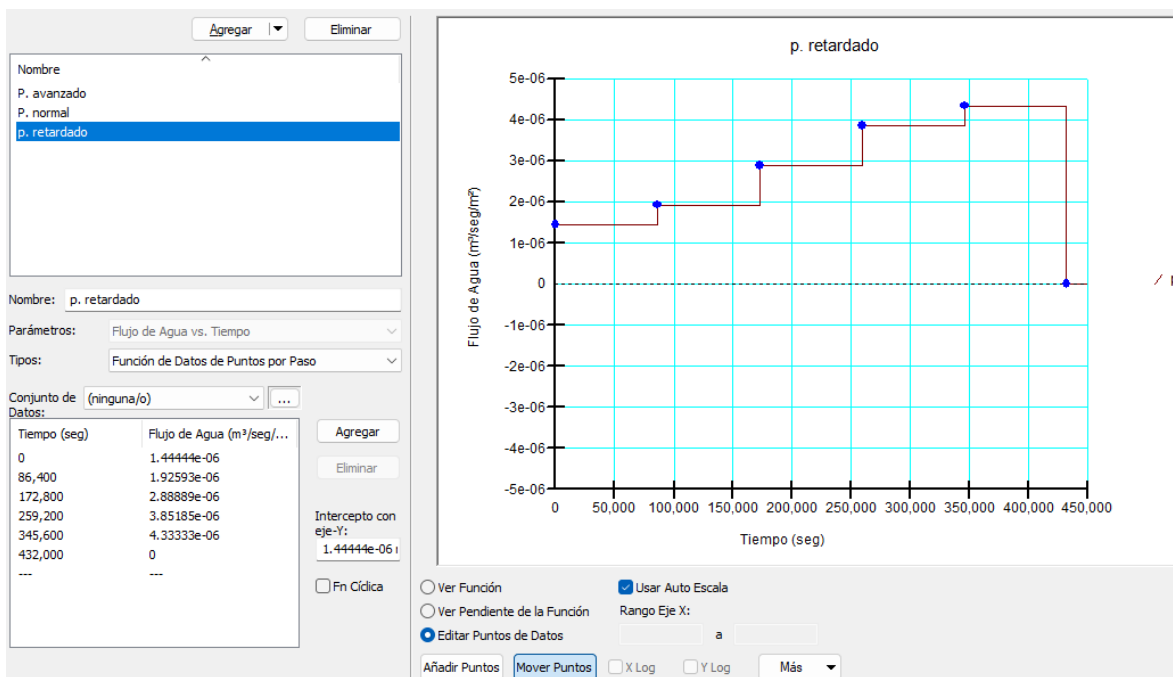


Figura 41. Incorporación de datos, patrón de lluvia retardado 1248 mm. Fuente:
Elaboración propia

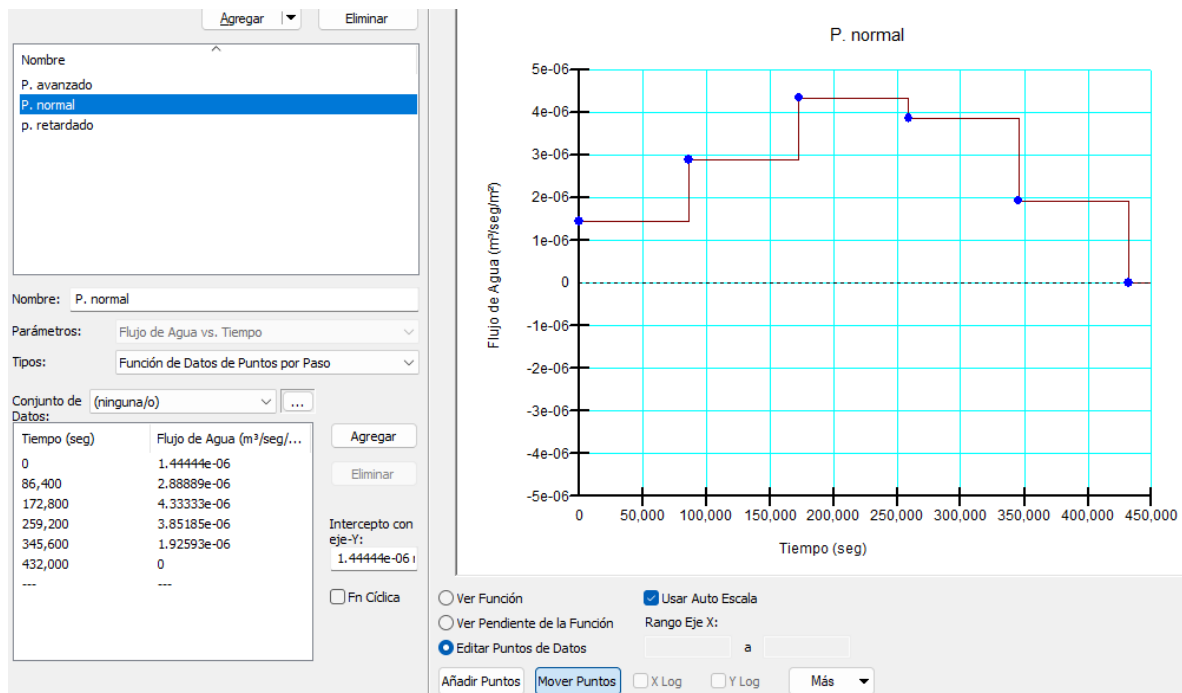


Figura 42. Incorporación de datos, patrón de lluvia Normal 1248 mm. Fuente:

Elaboración propia

A continuación, se aplicaron las respectivas lluvias con diferentes patrones a la zona de la pendiente, la zona alta y zona baja, para posteriormente obtener las primeras redes de flujo en el análisis de filtración ver figuras 43, 44 y 45.

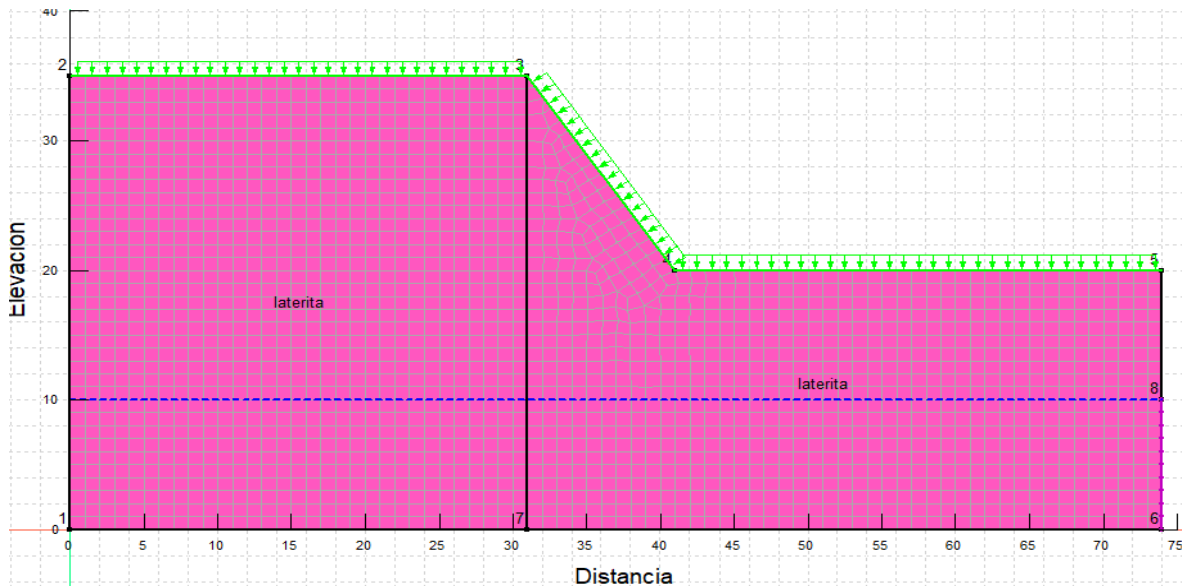


Figura 43. Aplicación de patrón de lluvia avanzado al talud modelo. Fuente: *Elaboración propia.*

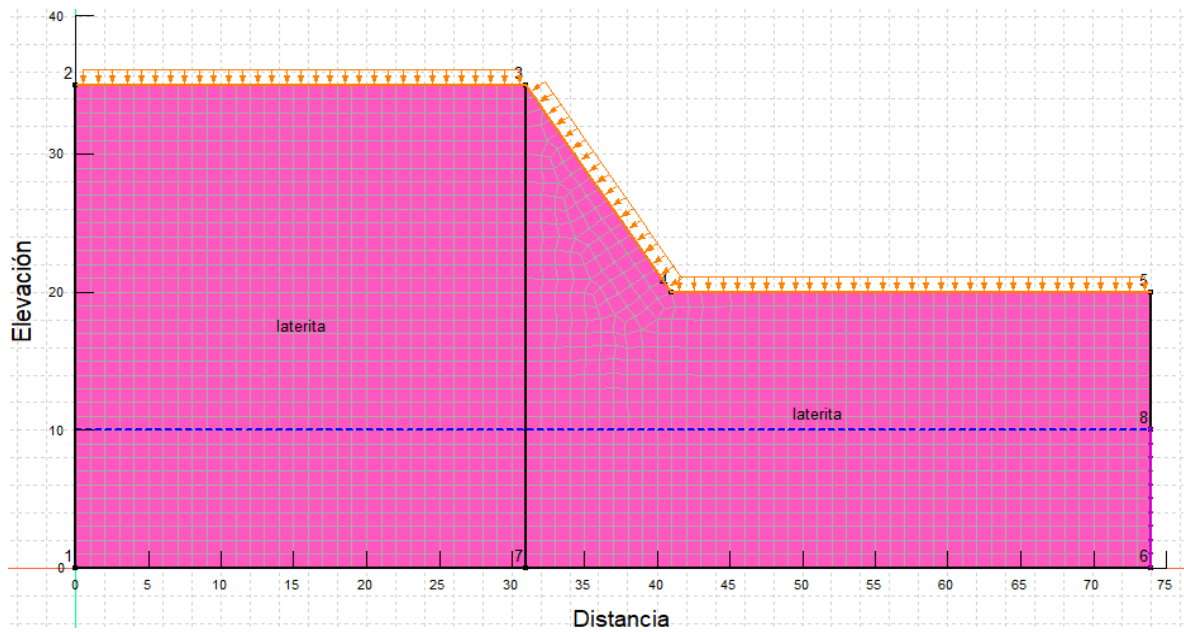


Figura 44. Aplicación de patrón de lluvia normal al talud modelo. Fuente: Elaboración propia.

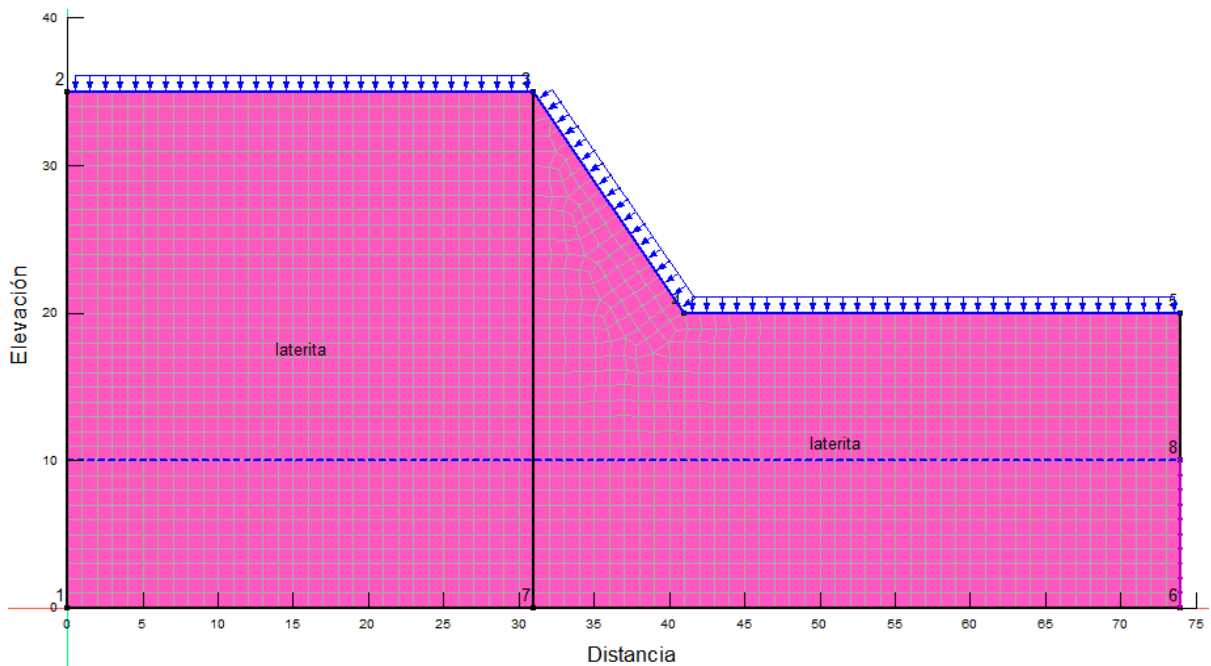


Figura 45. Aplicación de patrón de lluvia retardado al talud modelo. Fuente: Elaboración propia

Se obtuvieron las primeras redes de flujo para los patrones de lluvia, se observa en los tres casos el avance del frente húmedo con el paso del tiempo. Esto hace que las presiones de poro negativas incrementen. Aumenta los esfuerzos cortantes y la resistencia al corte

disminuye, igualmente el nivel freático no sufre mayor incremento durante las primeras horas en los 3 casos, ver Figuras 46 - 48

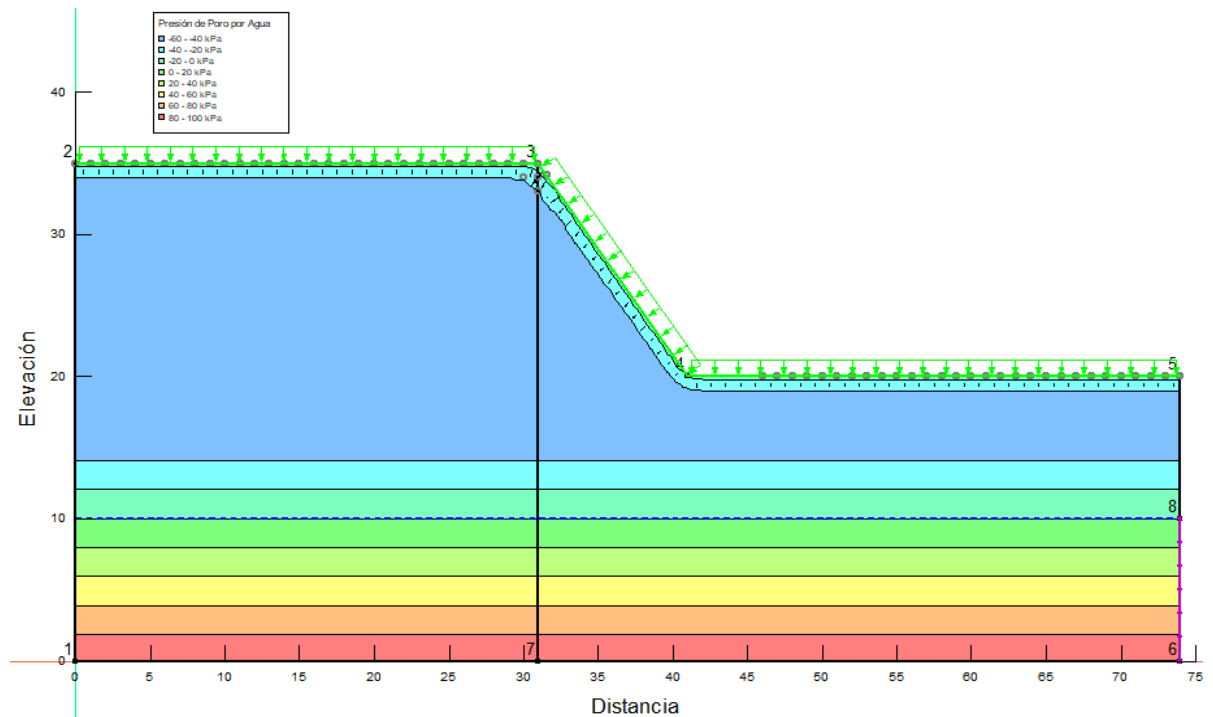


Figura 46. Aplicación de patrón de lluvia avanzado al Talud modelo 1248 mm . Filtración con línea de tiempo igual a 2 h. Fuente: Elaboración propia

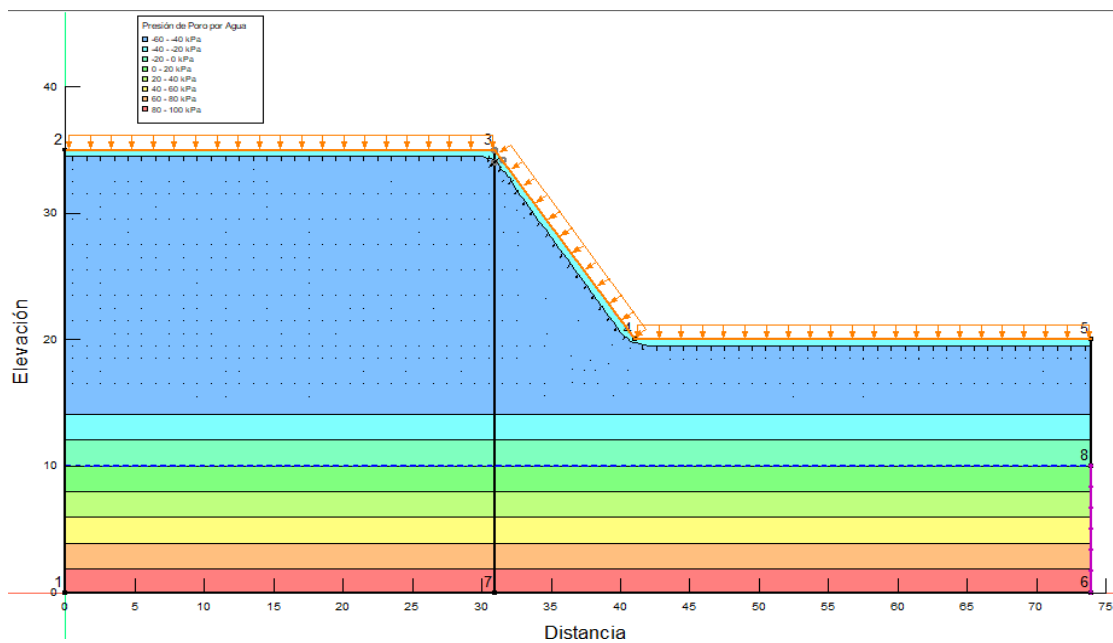


Figura 47 Aplicación de patrón de lluvia normal al Talud modelo 1248 mm . Filtración con línea de tiempo igual a 2 h. Fuente: Elaboración propia

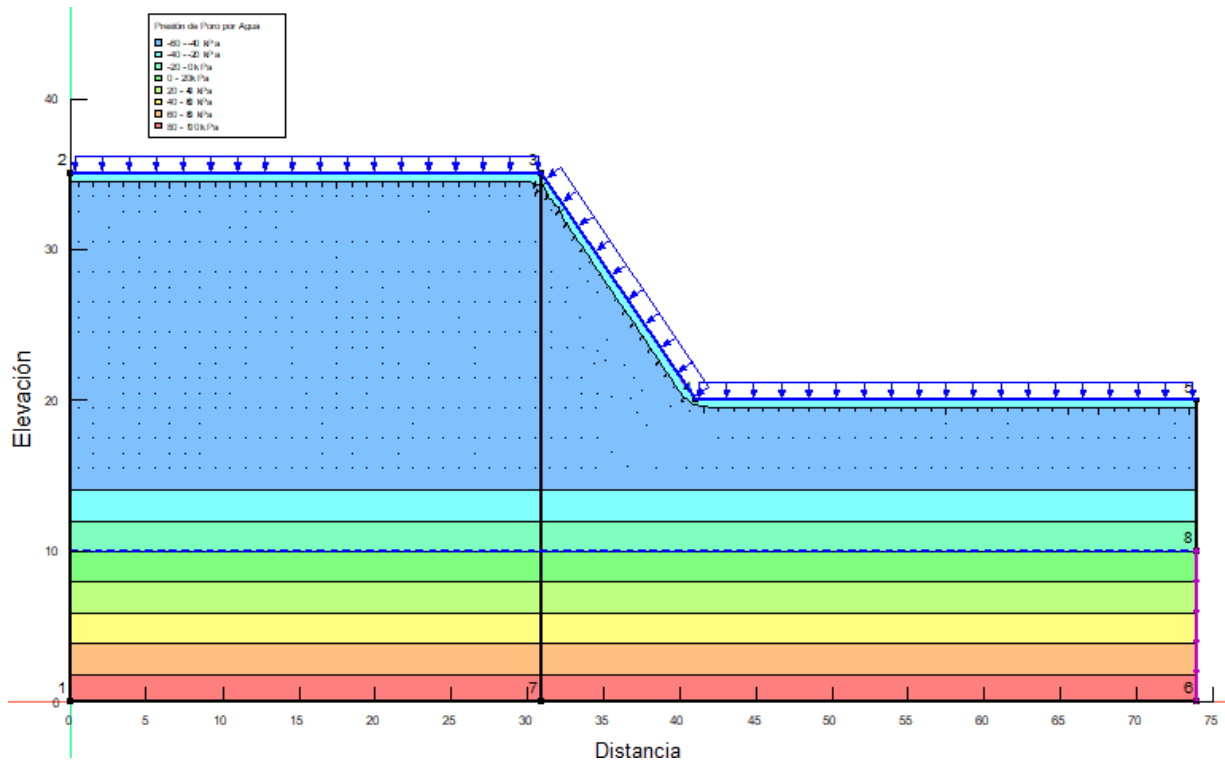


Figura 48. Aplicación de patrón de lluvia retardado al talud modelo 1248 mm. Filtración con línea de tiempo igual a 2 h. Fuente: Elaboración propia

Seguidamente y con el paso del tiempo las presiones de poro continúan aumentando. Esto debido a los patrones de lluvia aplicados, se puede evidenciar el frente húmedo en aumento. La proporción de agua infiltrada aumenta, el nivel freático tiende a un aumento generalmente donde la intensidad de la lluvia es alta, ver figuras 49, 50 y 51.

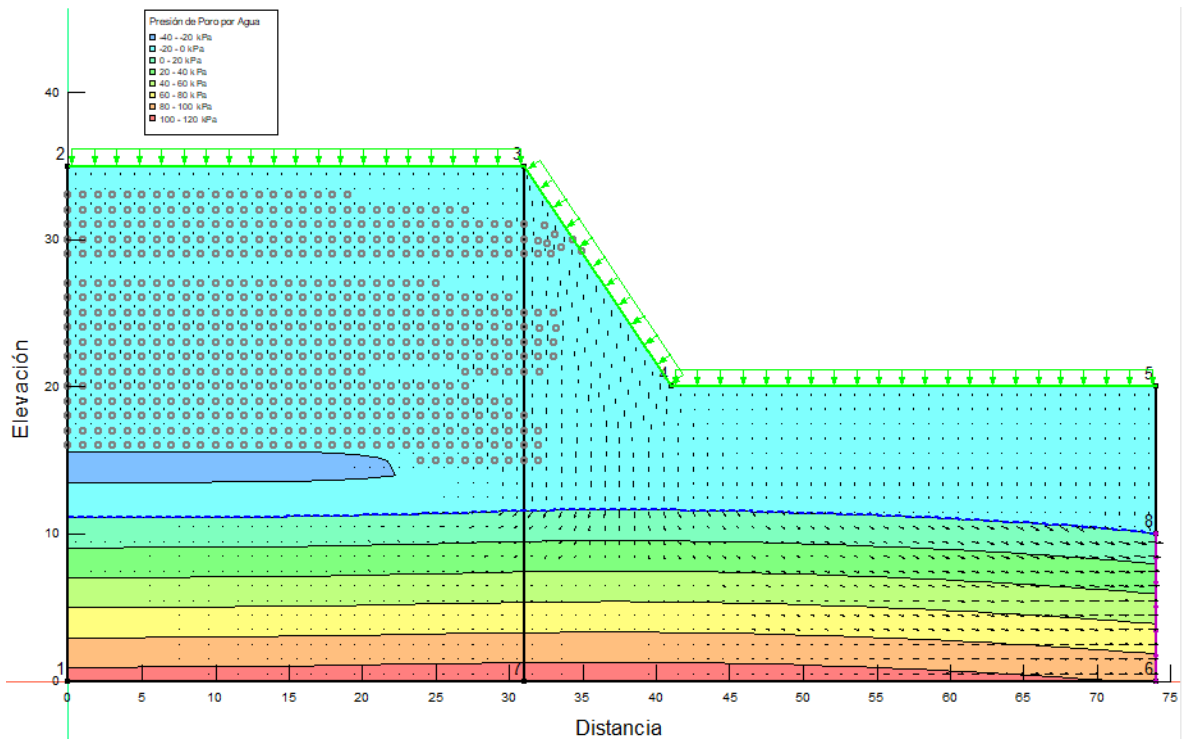


Figura 49. Aplicación de patrón de lluvia avanzado al talud modelo 1248 mm. Filtración con línea de tiempo igual a 4 días. Fuente: Elaboración propia

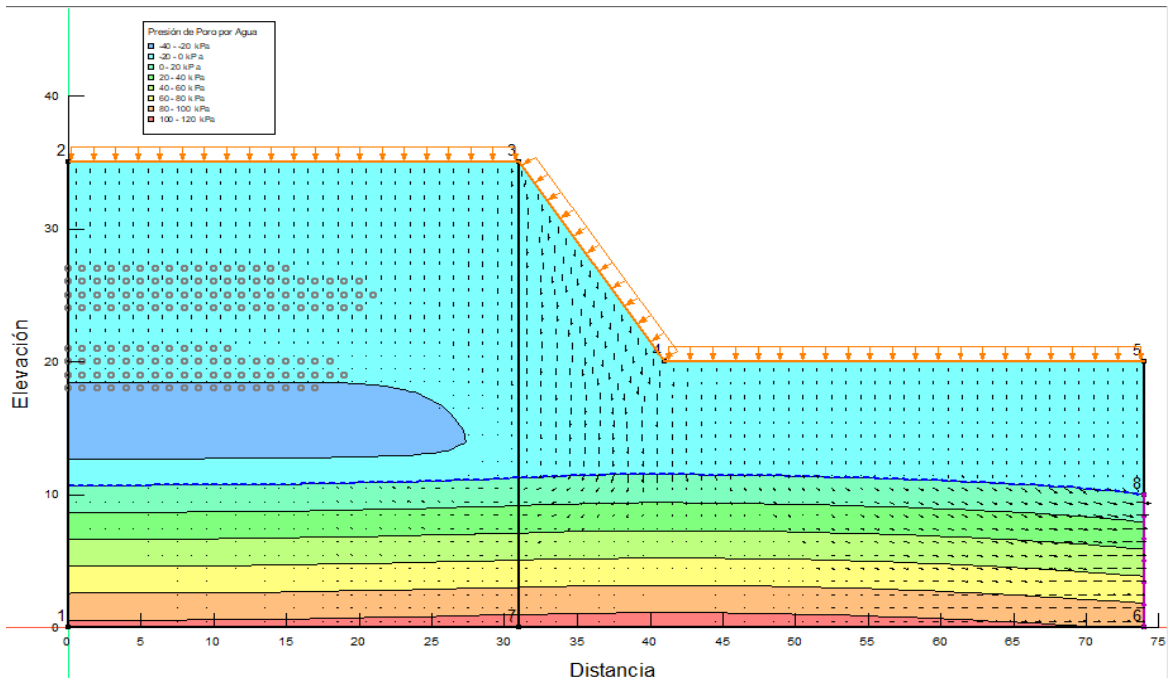


Figura 50. Aplicación de patrón de lluvia normal al talud modelo 1248 mm. Filtración con línea de tiempo igual a 4 días. Fuente: Elaboración propia

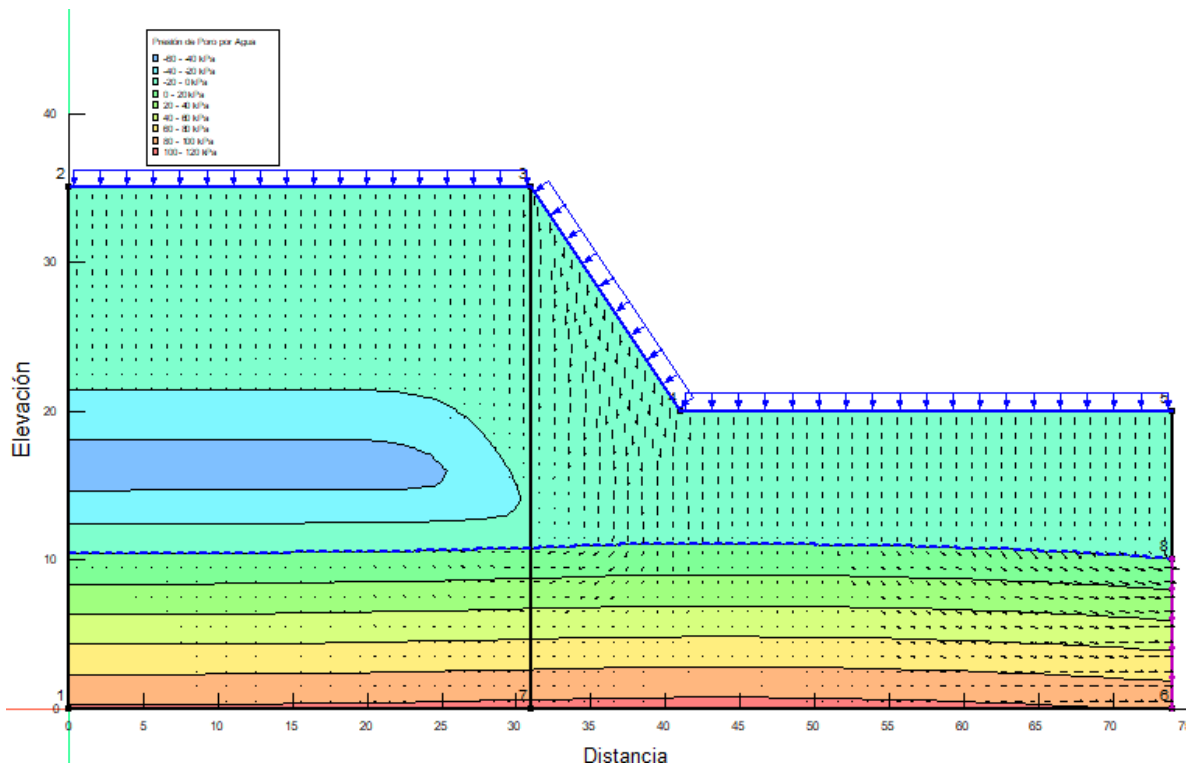


Figura 51. Aplicación de patrón de lluvia retardado al talud modelo 1248 mm. Filtración
Con línea de tiempo igual a 4 días. Fuente: Elaboración propia

3.3.5.3. Determinación del Factor de Seguridad de los taludes para cada red de flujo

Luego de obtener las redes de flujo para cada cantidad establecida de precipitación 312 mm, 624 mm y 1248 mm, se analizó el comportamiento del factor de seguridad. De esta manera se puede establecer la influencia de cada patrón de lluvia, en función de la cantidad de precipitación.

Teniendo en cuenta la geometría establecida y los resultados de las filtraciones, se incorporaron datos nuevos al software de trabajo GEOESTUDIO (www.geoslope.com). Estos datos son Ángulo de Fricción Interna (ϕ), cohesión (c), peso unitario, propiedades importantes en el estudio de estabilidad de taludes y que fueron recolectadas en la fase dos. A continuación, en la figura 52 se muestra la incorporación de datos adicionales.

The screenshot displays the 'Materiales' (Materials) section of the GEOESTUDIO software. At the top, there is a table with columns 'Nombre' (Name) and 'Color' (Color). The first entry is 'laterita' with a pink color swatch. To the right of the table are buttons for 'Agregar' (Add), 'Eliminar' (Delete), and 'Asignado...' (Assigned...). Below the table, there are input fields for 'Nombre:' (laterita) and 'Color:' (pink) with an 'Establecer...' (Set...) button. The 'Estabilidad de Taludes' (Slope Stability) section is active, showing 'Modelo Constitutivo:' (Constitutive Model) set to 'Mohr-Coulomb'. Below this are tabs for 'Básico' (Basic), 'Succión' (Suction), 'Env. R' (Env. R), 'Licuación' (Liquefaction), and 'Avanzado' (Advanced). The 'Básico' tab is selected, showing input fields for 'Peso Unitario:' (Unit Weight) set to '18.4 kN/m³', 'Cohesión:' (Cohesion) set to '26.7 kPa', and 'Phi:' (Friction angle) set to '29 °'.

Figura 52. Ingreso de datos relevantes para el análisis de estabilidad de talud. Fuente: *Elaboración propia.*

Igualmente se procedió a determinar el factor de seguridad por medio del método de Bishop incorporado en GEOESTUDIO (www.geoslope.com).

Para cada patrón de lluvia aplicado, se determinó una grilla de trabajo para referencia de factores de seguridad, esto con el fin de determinar el factor crítico global. Se establece una falla de Izquierda a derecha ver figura 53, de esta manera se implementó el modelo geométrico para el análisis de estabilidad del talud para cada patrón de lluvia ver figura 54.

Nombre: Estabilidad de Taludes p. avanzado Descripción:

Precedente: Filtración Transitoria P. avanzad

Tipo de Análisis: Bishop

Configuración Superficie de Deslizamiento Distribución Convergencia

Dirección de movimiento

☒ Izquierda a derecha ☐ Derecha a izquierda ☐ Usar modo pasivo

Opción Superficie de Deslizamiento

☐ Entrada y Salida

☒ Especifique líneas tangentes de radio

☒ Grilla y Radio

☐ Especificar Bloque

☐ No cruzar líneas de bloques de superficie de deslizamiento

☐ Completamente Especificada

☐ Cuckoo Search

No. de superficies de deslizamiento críticas para almacenar: 1

☐ Optimizar localización de la sup. de deslizamiento crítica

☐ Superficies de deslizamiento críticas de:

Figura 53. Método para análisis de estabilidad, método usado dovelas de Bishop (1955) , definición de grilla y dirección de movimiento de falla . Fuente: Elaboración propia.

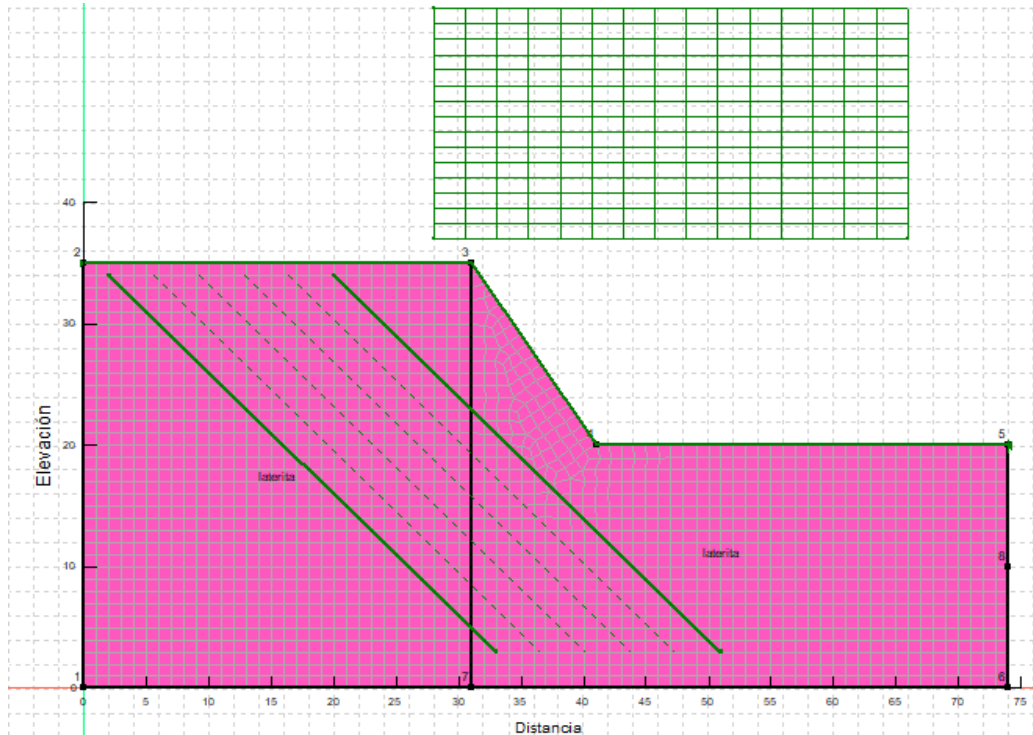


Figura 54. Modelo geométrico con malla definida para obtención de factor de seguridad con patrones de lluvia aplicados. Fuente: Elaboración propia.

La generación de los primeros resultados del factor de seguridad debido a los patrones de lluvia correspondiente a 1248 mm, se originan teniendo en cuenta los procesos de las fases anteriores. En la Figura 55 se muestran factores de seguridad obtenidos para el patrón de lluvia avanzado. Las franjas más críticas corresponden a las zonas rojas.

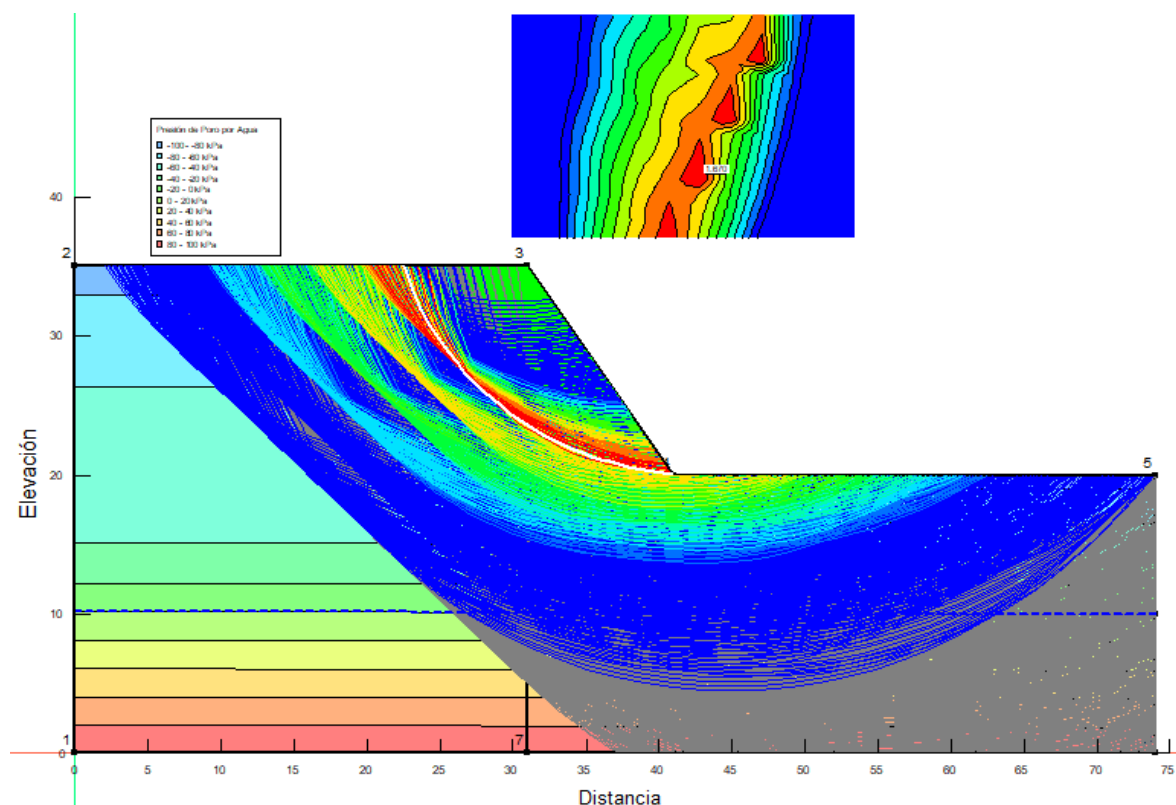


Figura 55. Factores y fallas críticas previas obtenidos en talud. Fuente: Elaboración propia.

Los factores mínimos fueron obtenidos en función de las lluvias establecidas durante cinco días (120 h). Las variaciones muestran que el factor de seguridad mínimo se alcanza durante los días dos y cuatro. Durante el día cinco el factor de seguridad empieza a restablecerse. Como se muestra a continuación en las figuras 56, 57 y 58.

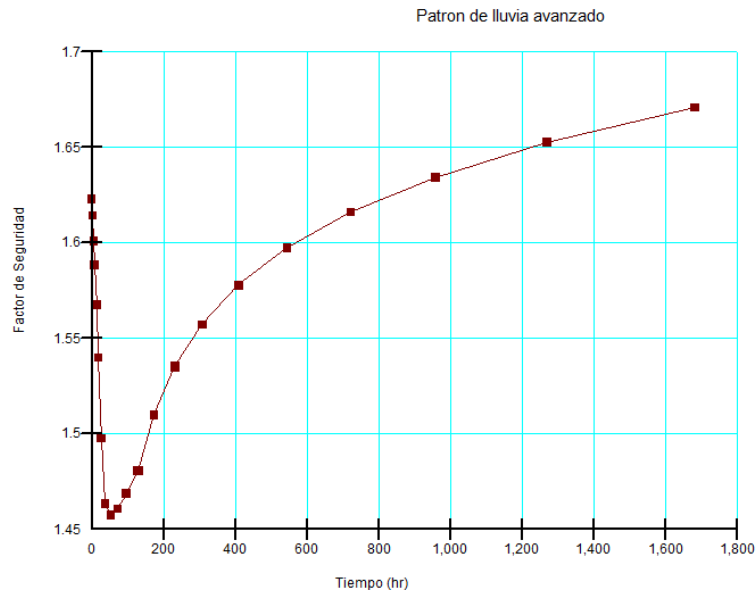


Figura 56. Comportamiento del factor de seguridad en el talud con una lluvia aplicada de 1248 mm, patrón de lluvia avanzado, periodo de aplicación, 5 días. FS mínimo =1.457 a las 52 h. Fuente: Elaboración propia.

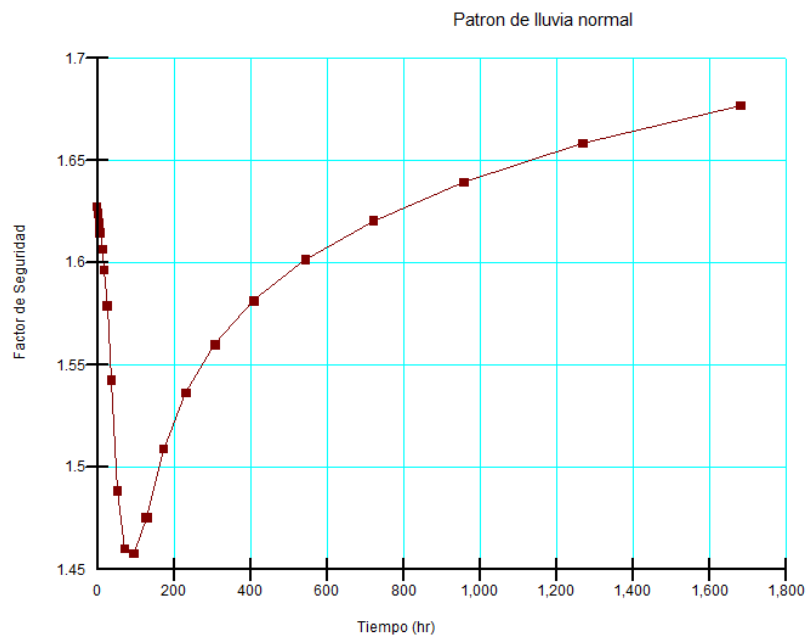


Figura 57. Comportamiento del factor de seguridad en el talud con una lluvia aplicada de 1248 mm, patrón de lluvia normal, periodo de aplicación, 5 días. FS mínimo =1.458 a las 96 h. Fuente: Elaboración propia.

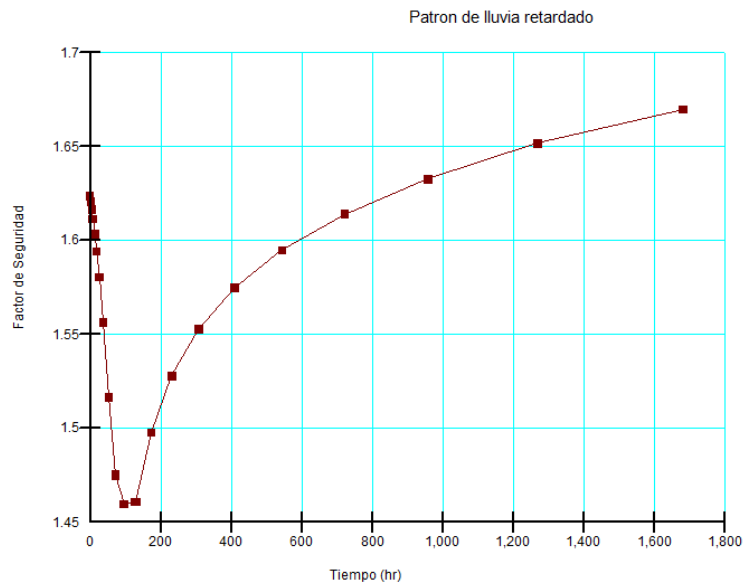


Figura 58. *Comportamiento del factor de seguridad en el talud con una lluvia aplicada de 1248 mm, patrón de lluvia retardado, periodo de aplicación, 5 días. FS mínimo =1.459 a las 96 h. Fuente: Elaboración propia.*

Este proceso fue el mismo para las precipitaciones con cantidades de 312 mm y 624 mm, los resultados varían debido a las cantidades establecidas. La recopilación de los resultados se muestra en el capítulo cuatro.

4. Resultados y análisis de resultados

En este capítulo se presentan y se analizan los resultados obtenidos para cada cantidad de lluvia en mm, 1248 mm, 624 mm y 312 mm. La afectación de las precipitaciones se refleja en la estabilidad del talud, esta estabilidad está representada mediante el valor del FS. La aplicación de la lluvia tuvo un periodo de cinco días. Posteriormente se estableció un periodo de 17 días sin lluvia, para observar la recuperación de la estabilidad del talud en este tipo de suelos.

En la tabla 17 se recopila información obtenida de la variación del FS con respecto al tiempo en h. Para una cantidad de precipitación igual a 1248 mm, la lluvia fue aplicada con tres patrones diferentes de lluvia, estos patrones fueron avanzado, retardado y normal. Los resultados son mostrados en la figura 59.

TIEMPO (h)	FS con patrón avanzado	FS con patrón retardado	FS con patrón normal
0	1.623	1.624	1.627
2	1.614	1.621	1.624
5	1.601	1.616	1.620
8	1.589	1.611	1.615
13	1.567	1.604	1.607
19	1.540	1.594	1.597
27	1.498	1.580	1.579
38	1.464	1.556	1.542
52	1.458	1.517	1.489
71	1.461	1.475	1.460
96	1.469	1.460	1.458
129	1.481	1.461	1.475
173	1.510	1.498	1.509
231	1.535	1.528	1.536
307	1.558	1.553	1.560
409	1.578	1.575	1.582
543	1.597	1.595	1.602
FS mínimo	1.458	1.460	1.458

Tabla 17. Información obtenida del comportamiento del FS para los patrones de lluvia avanzado, normal y retardado, conformados con una lluvia igual a 1248 mm. Fuente: *Elaboración propia.*

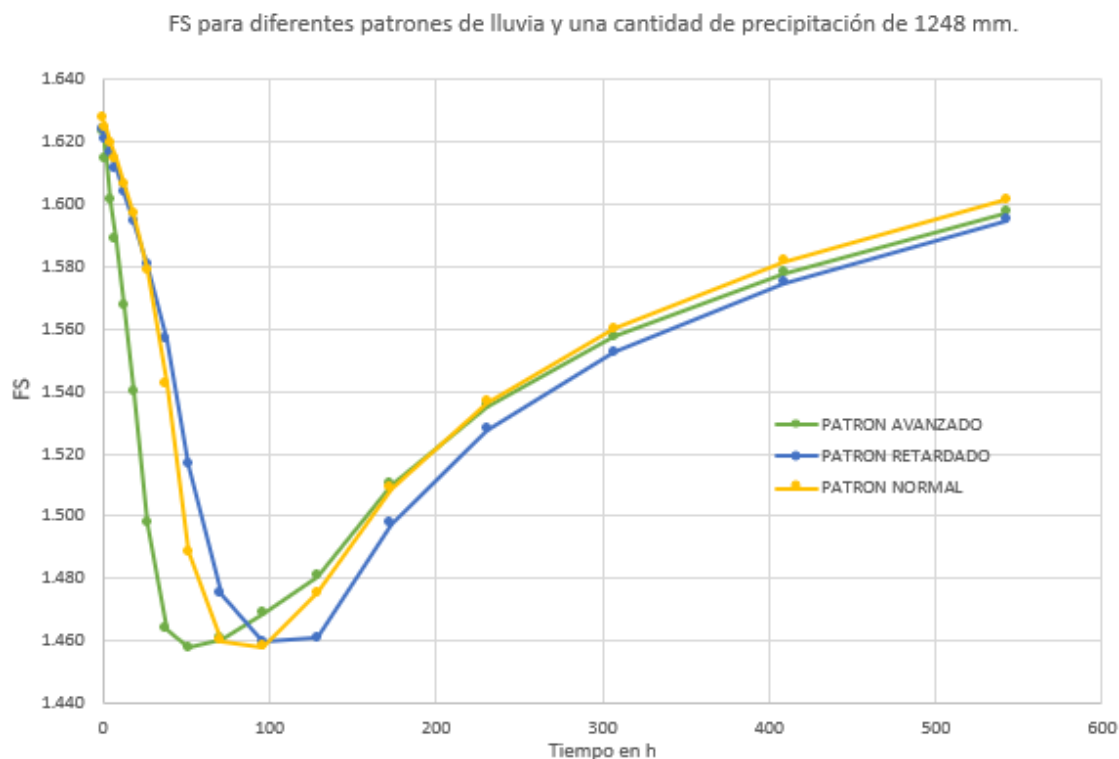


Figura 59. Resultados obtenidos para cada patrón de lluvia, cantidad de precipitación 1248 mm. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 18 se recopila información obtenida de la variación del FS con respecto al tiempo en h. Para una cantidad de precipitación igual a 624 mm, la lluvia fue aplicada con tres patrones de lluvias diferentes, estos patrones fueron avanzado, retardado y normal. Los resultados son mostrados en la figura 60.

TIEMPO (h)	FS con patrón avanzado	FS con patrón retardado	FS con patrón normal
0	1.623	1.624	1.627
2	1.619	1.622	1.626
5	1.612	1.620	1.623
8	1.605	1.618	1.621
13	1.593	1.614	1.617
19	1.580	1.609	1.612
27	1.561	1.601	1.603
38	1.533	1.590	1.584
52	1.500	1.572	1.557
71	1.483	1.536	1.506

TIEMPO (h)	FS con patrón avanzado	FS con patrón retardado	FS con patrón normal
96	1.486	1.491	1.481
129	1.497	1.481	1.492
173	1.521	1.508	1.519
231	1.542	1.534	1.543
307	1.562	1.557	1.564
409	1.581	1.577	1.585
543	1.600	1.597	1.604
FS mínimo	1.483	1.481	1.481

Tabla 18. Información obtenida del comportamiento del FS para los patrones de lluvia avanzado, normal y retardado, conformados con una lluvia igual a 624 mm. Fuente: Elaboración propia.

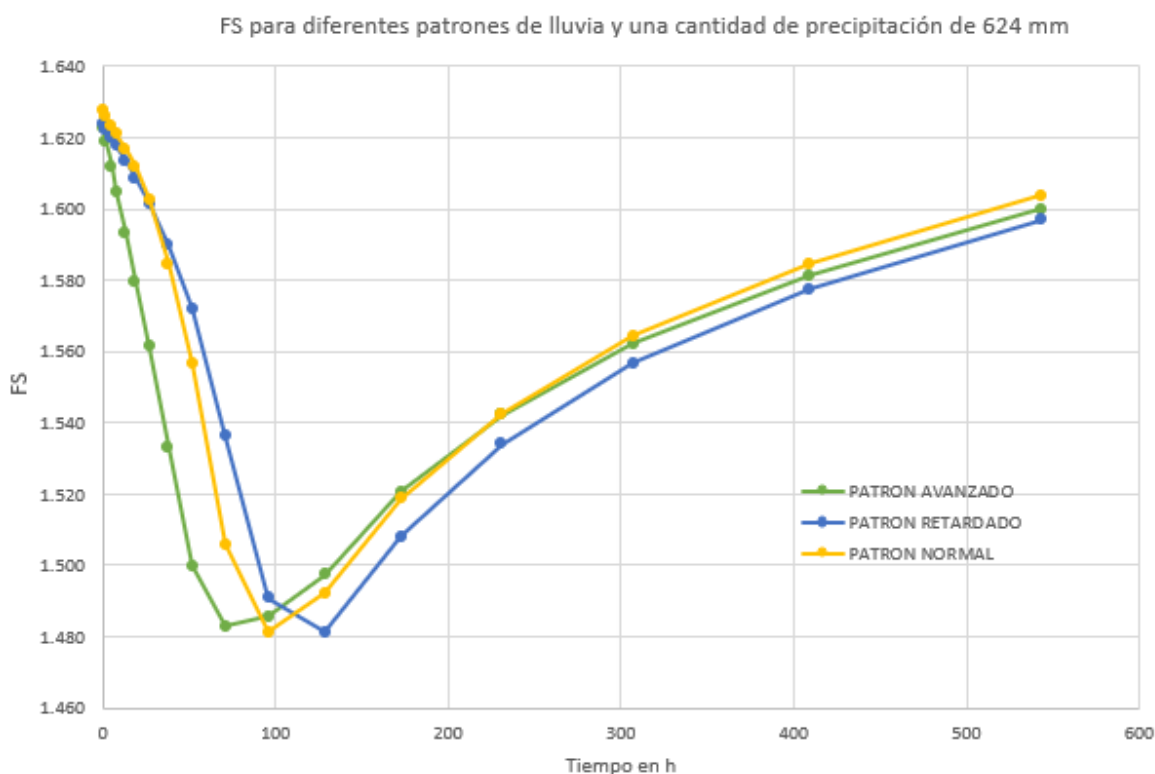


Figura 60. Resultados obtenidos para cada patrón de lluvia. Cantidad de precipitación 624 mm. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 19 se recopila información obtenida de la variación del FS con respecto al tiempo en h. Para una cantidad de precipitación igual a 312 mm, la lluvia fue aplicada en tres patrones de lluvia diferentes, estos patrones fueron avanzado, retardado y normal. Los resultados son mostrados en la figura 61.

Tiempo (h)	FS con patrón avanzado	FS con patrón retardado	FS con patrón normal
0	1.623	1.627	1.627
2	1.621	1.627	1.627
5	1.617	1.626	1.626
8	1.614	1.624	1.624
13	1.608	1.622	1.622
19	1.601	1.620	1.620
27	1.591	1.615	1.615
38	1.579	1.606	1.606
52	1.562	1.592	1.592
71	1.541	1.566	1.566
96	1.524	1.533	1.533
129	1.522	1.522	1.522
173	1.535	1.535	1.535
231	1.552	1.553	1.553
307	1.569	1.571	1.571
409	1.586	1.589	1.589
543	1.604	1.607	1.607
FS mínimo	1.522	1.522	1.522

Tabla 19. Información obtenida del comportamiento del FS para los patrones de lluvia avanzado, normal y retardado, conformados con una lluvia igual a 312 mm. Fuente: *Elaboración propia.*

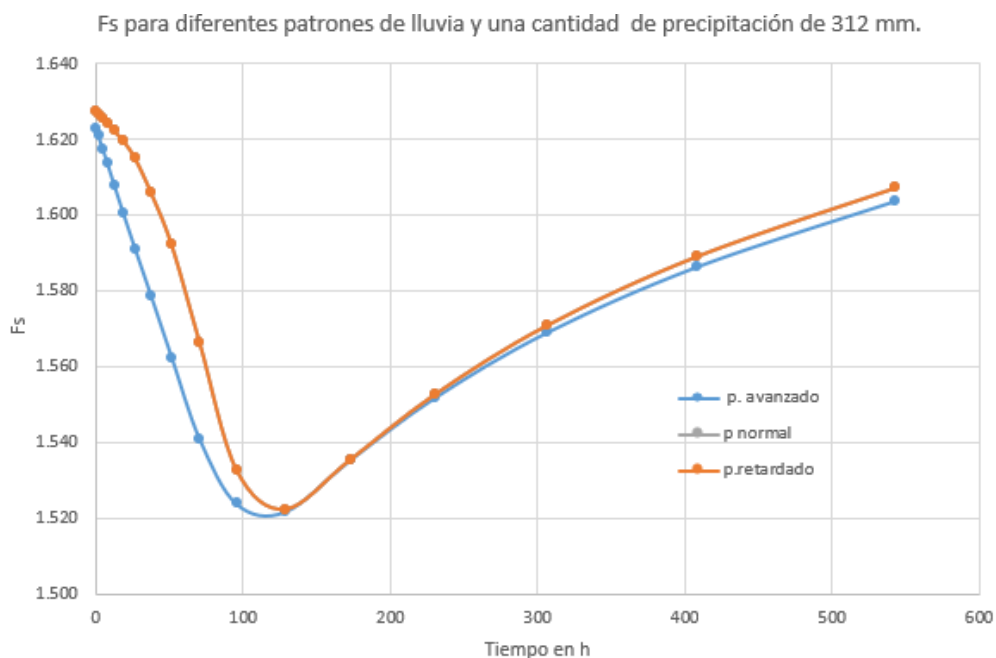


Figura 61. Resultados obtenidos para cada patrón de lluvia. Cantidad de precipitación 312 mm. Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores se logró establecer los FS. mínimos para cada patrón de lluvia y su relación con el tiempo. De esta manera se logra determinar cuál es el patrón de lluvia que alcanza una afectación inicial en la estabilidad del talud, ver tabla 20.

Cantidad de precipitación aplicada en mm. Para cinco días	patrón retardado	patrón normal	patrón avanzado
312	FS mínimo = 1.522 días = 5.37	FS mínimo = 1.522 días = 5.37	FS mínimo = 1.521 días = 5.37
624	FS mínimo = 1.481 días = 5.37	FS mínimo = 1.481 días = 4	FS mínimo = 1.483 días = 2.95
1248	FS mínimo = 1.459 días = 4	FS mínimo = 1.458 días = 4	FS mínimo = 1.457 días = 2.16

Tabla 20. Valores del FS mínimo obtenidos en el tiempo para cada patrón de lluvia y sus cantidades en mm. Fuente: elaboración propia.

Para la precipitación de 312 mm el FS mínimo se presenta con el patrón avanzado, aunque la variación es mínima se puede establecer como el patrón que afecta en primera instancia al talud. El comportamiento del FS en el tiempo es relativamente similar para los patrones normal y retardado.

En la precipitación de 624 mm, aunque el FS del patrón avanzado no es el mínimo, es el que más rápido afecta el talud. Mientras los FS mínimos del patrón normal y retardado son los que más afectación tienen sobre el talud, aunque varíen en un día aproximadamente.

Para la precipitación de 1248 mm el patrón avanzado afecta mayormente al talud y en un tiempo muy corto, aproximadamente dos días. El patrón retardado y normal se demoran un poco más en conseguir sus FS mínimos y son muy similares.

Según los resultados obtenidos es evidente como la cantidad de precipitación en mm influye en la estabilidad de taludes. A medida que las precipitaciones aumentan la inestabilidad en los taludes también aumenta. Para una cantidad de 312 mm de precipitación el FS mínimo es relativamente similar para los tres patrones de lluvia.

Para la precipitación de 624 mm el factor de seguridad del patrón retardado y normal son los mínimos, aunque se obtienen en días diferentes. El patrón avanzado tiene un factor relativamente más alto, aunque es el primero que se consigue en la línea del tiempo igual a los 2.95 días.

Para una cantidad de lluvia igual a 1248 mm el Factor de seguridad mínimo se obtiene con el patrón avanzado.

Los patrones de lluvia avanzados son los que afectan más a la estabilidad del talud. Aunque en la precipitación de 624 mm el Factor de seguridad mínimo no corresponde al patrón avanzado, es el patrón avanzado el que más rápido afecta al talud.

Es importante establecer las variaciones en el tiempo. De esta manera se logró establecer los procesos de recuperación en la estabilidad del talud. La pendiente de recuperación (mr) en % muestra el grado estabilización para cada patrón de lluvia. Este proceso se da luego de teminar la aplicación de las lluvias. La figura 62 muestra la pendiente de recuperación para el patrón avanzado en la precipitación de 312mm. La Tabla 21 muestra las pendientes de recuperación.

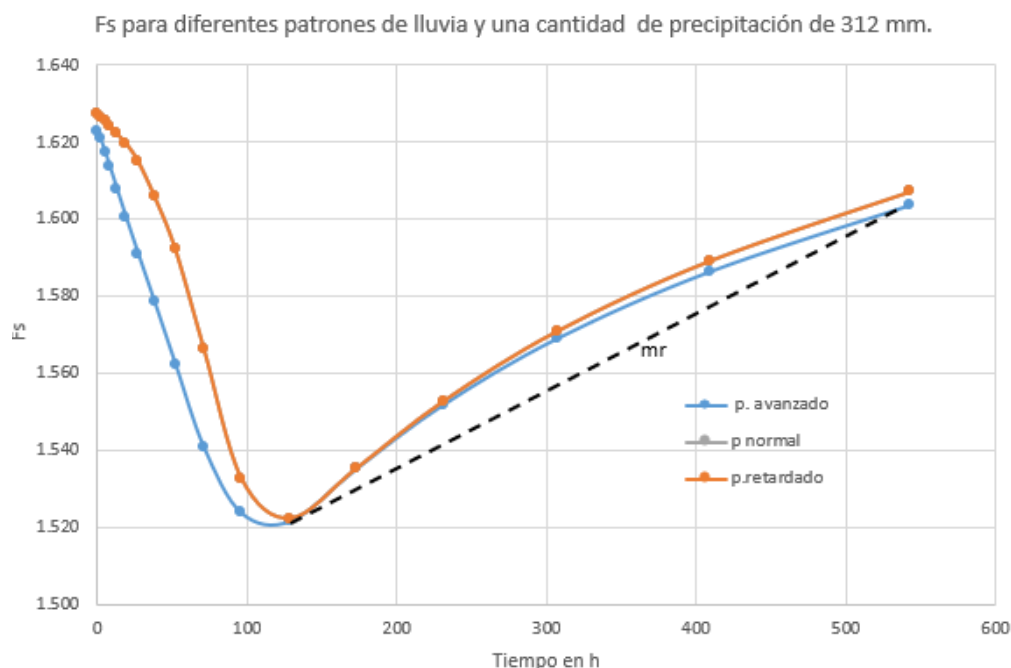


Figura 62. Pendiente de recuperación para el patrón avanzado, con precipitación de 312 mm, Fuente: elaboración propia

Cantidad de precipitación en mm, precipitación en 5 días	Patrón Retardado mr %	Patrón Normal mr %	Patrón Avanzado mr %
312	mr = 0.020	mr = 0.020	mr = 0.019
624	mr = 0.027	mr = 0.026	mr = 0.024
1248	mr = 0.032	mr = 0.030	mr = 0.028

Tabla 21. Valores de las pendientes de recuperación de la estabilidad del talud, luego de la aplicación de los patrones de lluvias durante cinco días. Fuente: elaboración propia

Para la precipitación de 312 mm los patrones de lluvia normal y retardado el proceso de recuperación de la estabilidad del talud es similar y se recupera más rápido. Mientras el proceso de recuperación de estabilidad con el patrón de lluvia avanzado es lento, pero no difiere demasiado con respecto a los otros dos.

Para la precipitación de 624 mm el proceso de recuperación de estabilidad del talud tiene un proceso más rápido con el patrón retardo y normal. Mientras el patrón avanzado tiende a tomar más tiempo para restablecer su estabilidad.

Para la precipitación de 1248 mm se puede establecer que el talud tiende a recuperar su estabilidad mucho más rápido cuando es afectado por el patrón retardado. Mientras que con los patrones normal y avanzado su proceso de recuperación de estabilidad es menos efectivo.

Los taludes en donde se aplicaron los patrones de lluvias retardados y normales tienden a recuperar su estabilidad de una manera más rápida, en comparación a los patrones de lluvia avanzados. Se puede deducir que los patrones de lluvia avanzados afectan en mayor medida a la estabilidad de los taludes no solo por alcanzar factores mínimos sino al parecer por el proceso de recuperación en su estabilidad.

El comportamiento de las presiones de poro tendió a aumentar por la aplicación de las lluvias en todos los patrones. A continuación, se presenta el comportamiento de las presiones de poro en diferentes zonas del talud para la precipitación de 312mm. El avance del frente húmedo durante el periodo de aplicación varía.

Las presiones de poro influyen en este proceso de estabilidad, igualmente en el nivel freático, figuras 63, 64 y 65.

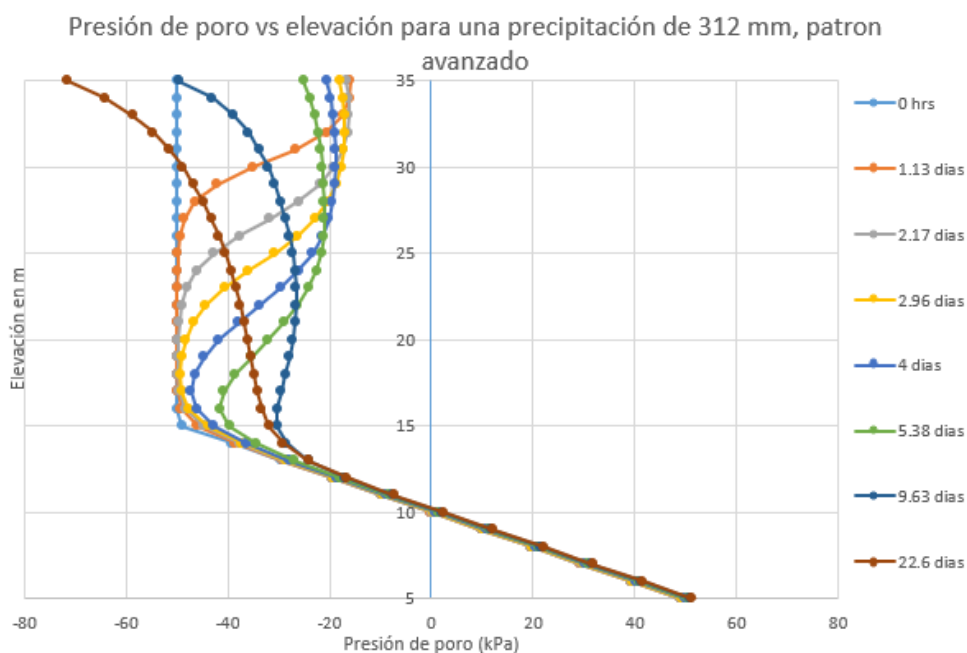


Figura 63. Comportamiento de la presión de poro vs elevación. Precipitación de 312mm en cinco días, patrón avanzado . Fuente: Elaboración propia

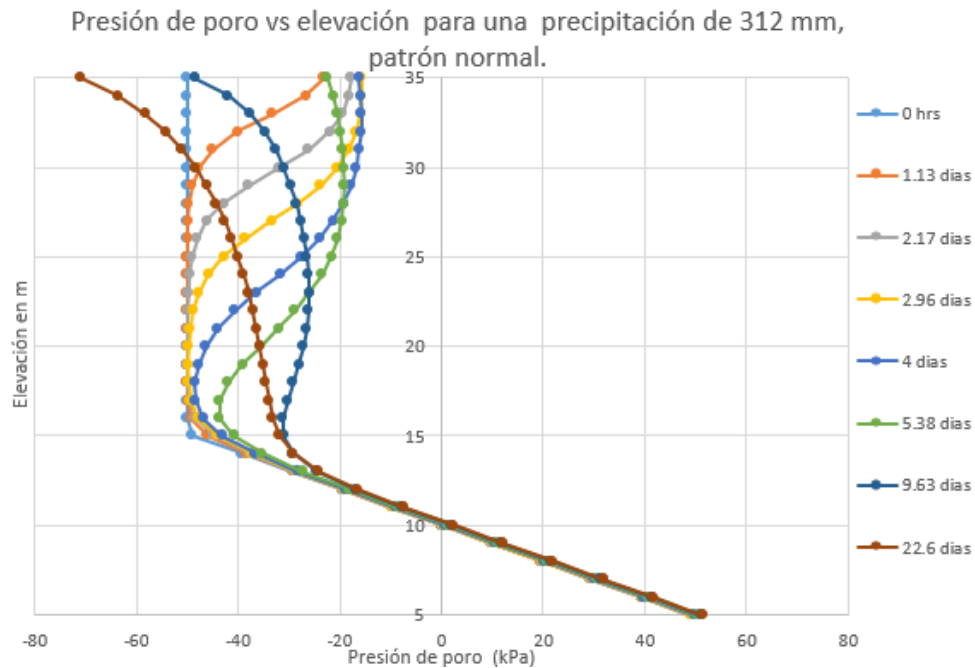


Figura 64. Comportamiento de la presión de poro vs elevación. Precipitación de 312mm en cinco días, patrón normal. Fuente: Elaboración propia

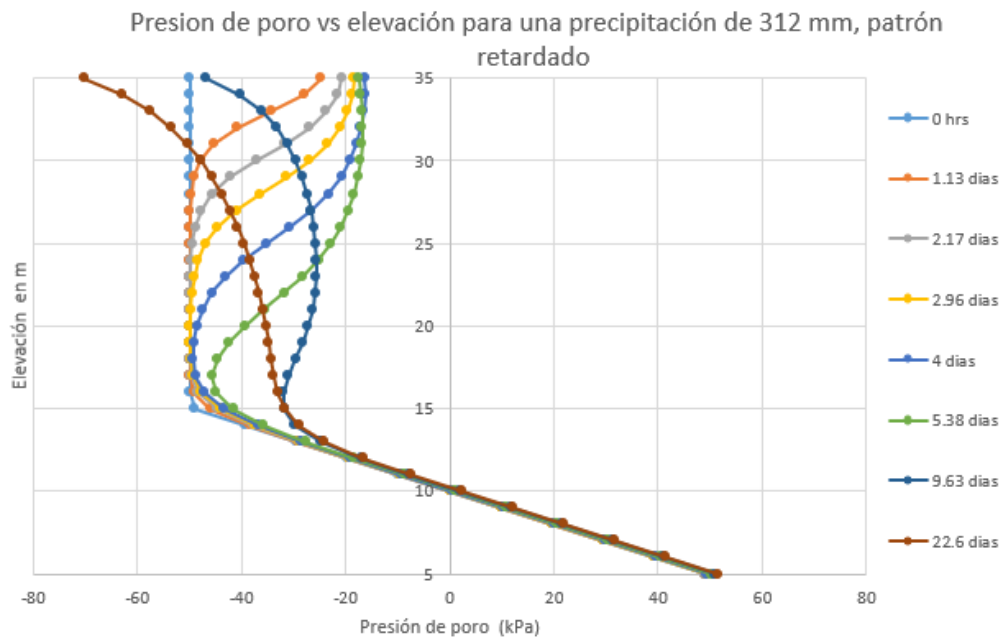


Figura 65. Comportamiento de la presión de poro vs elevación. Precipitación de 312mm en cinco días, patrón retardado. Fuente: Elaboración propia

Las presiones de poro muestran una tasa de incremento mayor en el patrón avanzado. Esto se presenta en los primeros días de las lluvias. Por otra parte, los patrones de lluvia retardado

y normal mantienen rangos similares en cuanto a los valores de las presiones de poro. En la zona cercana al pie del talud las presiones de poro muestran una variación entre 19 kPa y 23 kPa. mientras en la zona de nivel freático se presentan cambios mínimos.

Las Figuras 66, 67 y 68 muestran el comportamiento de las presiones de poro para la lluvia de 624 mm.

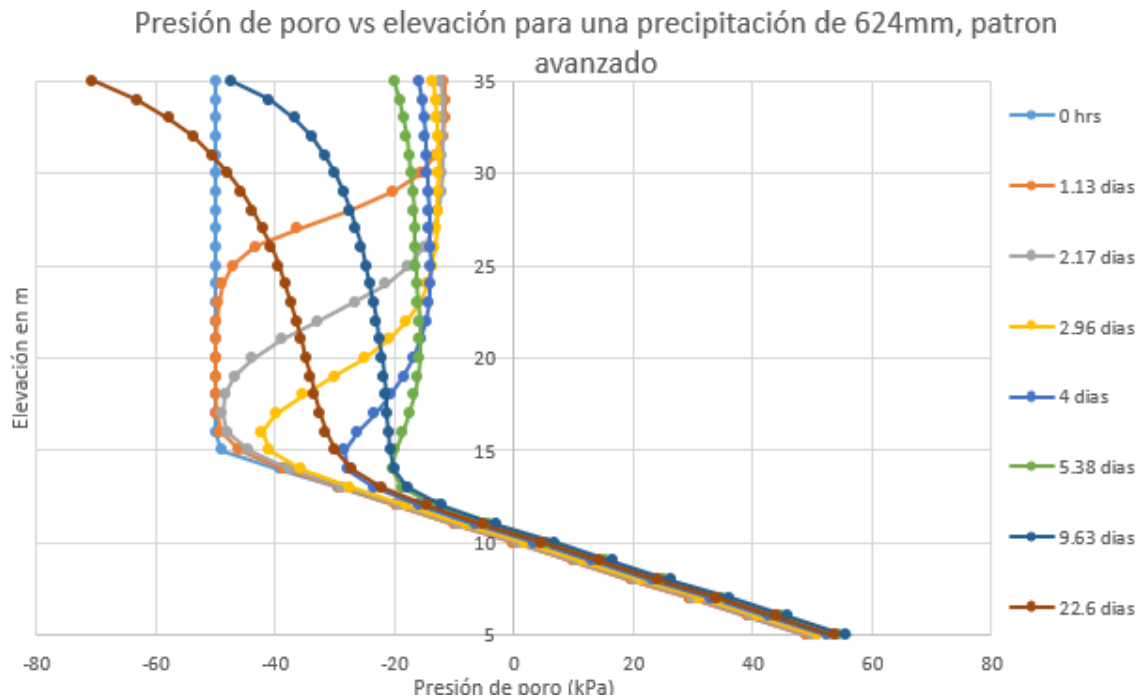


Figura 66. Comportamiento de la presión de poro vs elevación. Precipitación de 624 mm en cinco días, patrón avanzado. Fuente: Elaboración propia

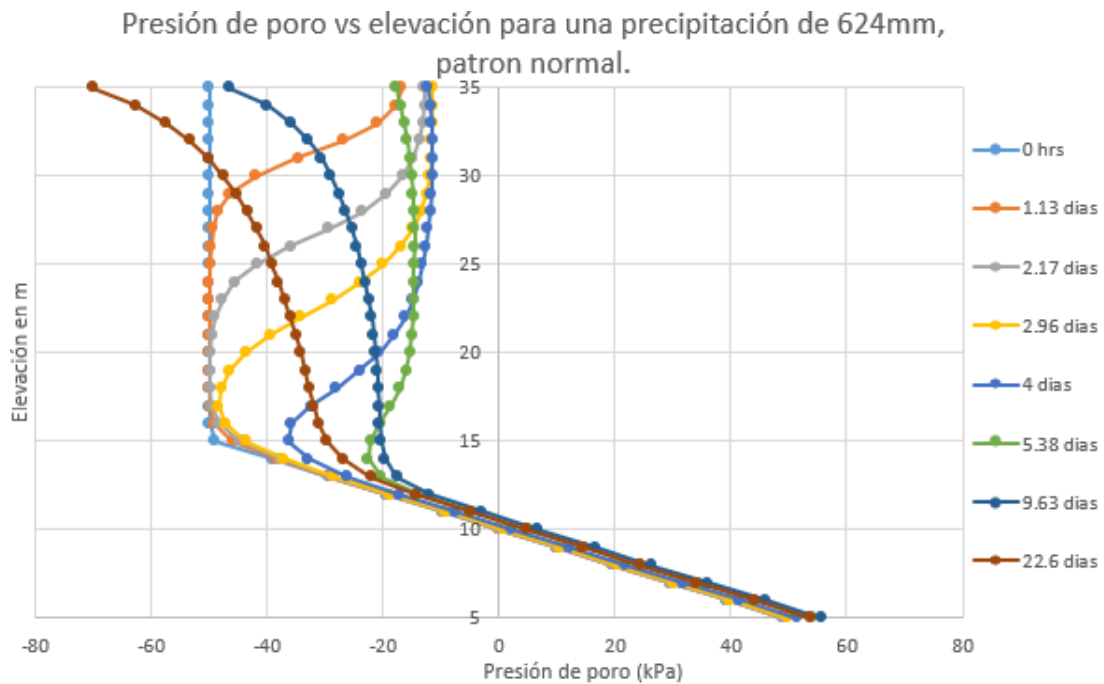


Figura 67. Comportamiento de la presión de poro vs elevación. Precipitación de 624 mm en cinco días, patrón normal. Fuente: Elaboración propia

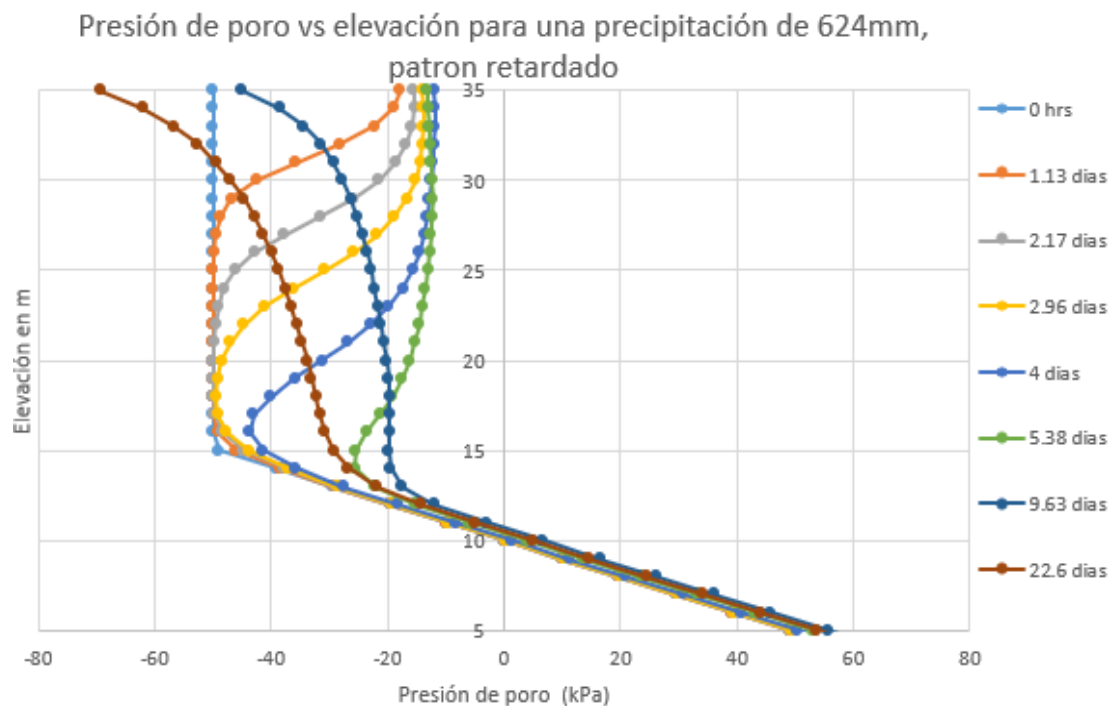


Figura 68. Comportamiento de la presión de poro vs elevación. Precipitación de 624 mm en cinco días, patrón retardado. Fuente: Elaboración propia

En las presiones de poro del patrón avanzado hay una tendencia a variar mucho más rápido en los primeros días de lluvia en la pendiente del talud. las presiones de poro aumentan con respecto a la lluvia de 312 mm. Los valores de las presiones varían entre 38 KPa y 35 KPa Para todos los patrones de lluvia en esta zona. En la zona cercana al pie de talud las presiones varían igual que las presiones obtenidas para la lluvia de 312 mm.

Las figuras 69, 70 y 71 muestran el comportamiento de las presiones de poro para la lluvia de 1248 mm.

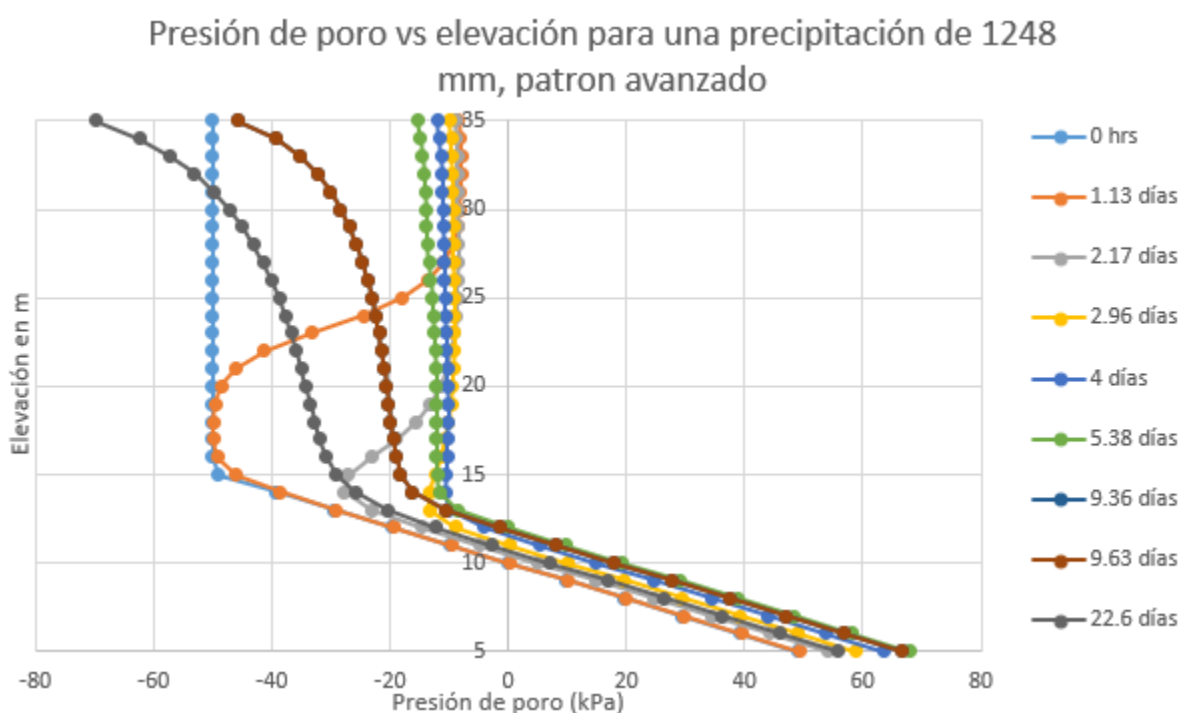


Figura 69. Comportamiento de la presión de poro vs elevación. Precipitación de 1248 mm en cinco días, patrón avanzado. Fuente: Elaboración propia

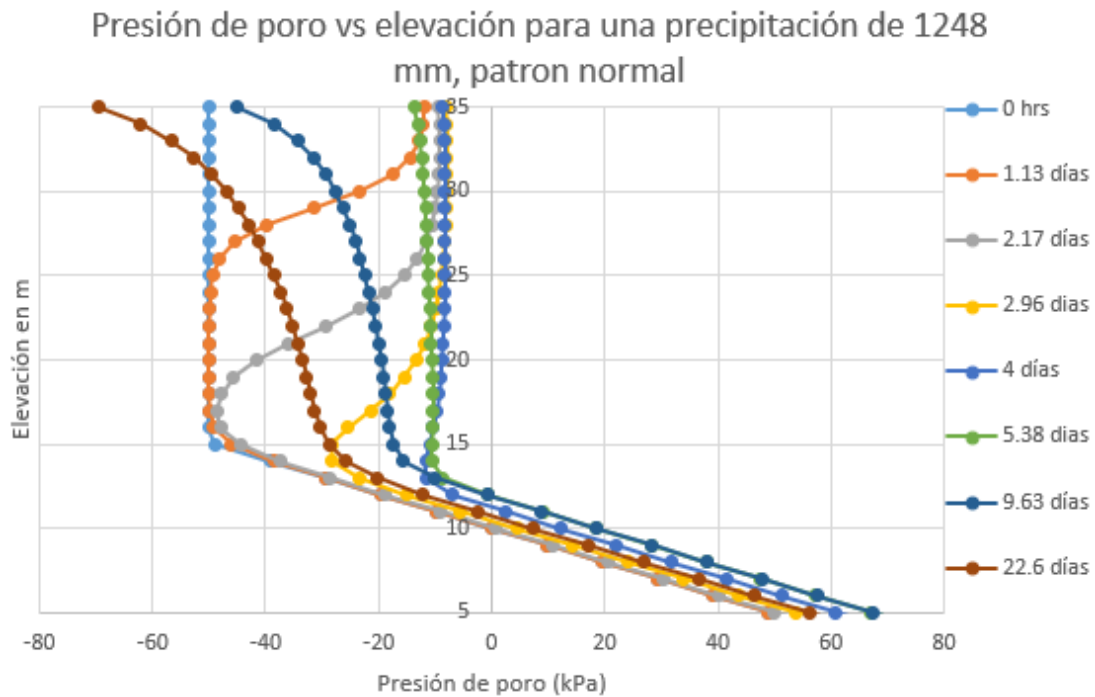


Figura 70. Comportamiento de la presión de poro vs elevación. Precipitación de 1248 mm en cinco días, patrón normal. Fuente: Elaboración propia

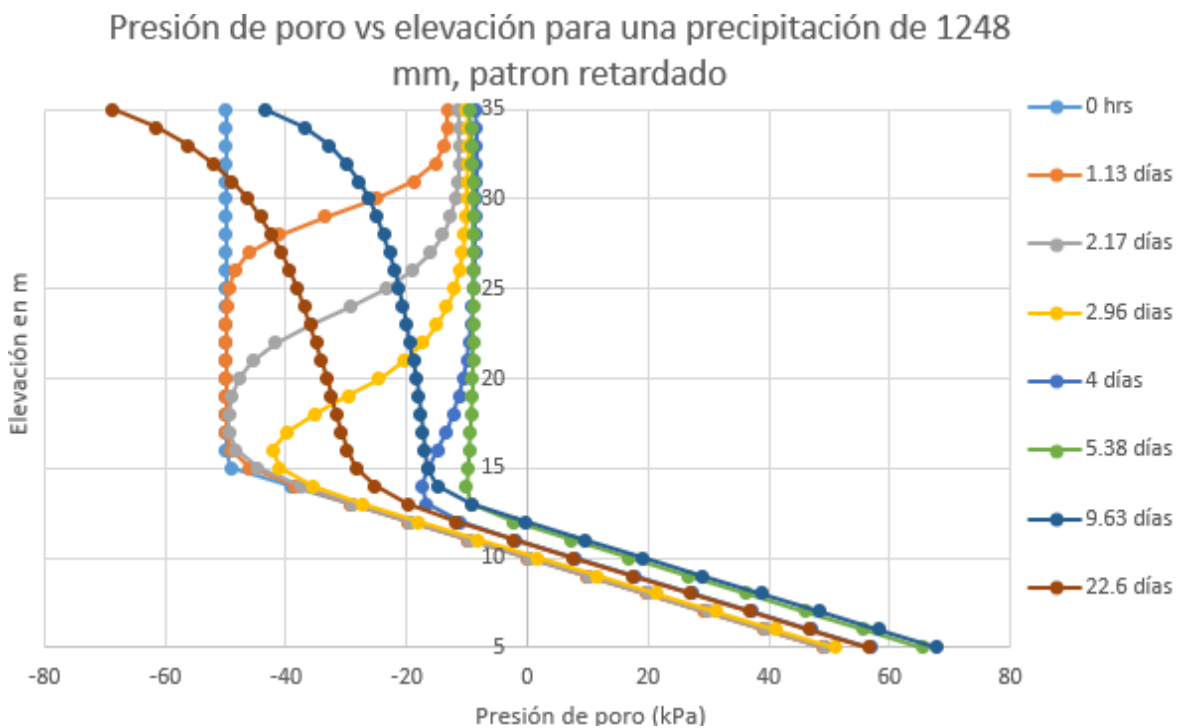


Figura 71. Comportamiento de la presión de poro vs elevación. Precipitación de 1248 mm en cinco días, patrón retardado. Fuente: Elaboración propia

Las presiones de poro aumentan con respecto a las lluvias de 312 mm y 624 mm. Las presiones de poro del patrón de lluvia avanzado varían significativamente en los primeros días. Las variaciones llegan hasta 42 kPa en la zona de pendiente de talud y parte del pie de talud. Se muestra como presiones de poro cercanas al nivel freático (10.5m y 11m) suben hasta los 12 y 13 metros. Por esta razón el nivel freático tiene un pequeño cambio significativo en su profundidad.

5. Conclusiones y recomendaciones

A partir de este proyecto denominado INFLUENCIA DE LAS LLUVIAS ANTECEDENTES EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN UN SUELO LATERÍTICO DE JAMUNDÍ (VALLE DEL CAUCA) se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Es evidente como la cantidad de lluvia afecta de manera significativa la estabilidad de los taludes en este tipo de suelos. Los factores de seguridad mostraron un comportamiento inversamente proporcional a medida que las precipitaciones aumentaron.
- Se observó cómo los patrones de lluvia denominados avanzados tuvieron un efecto más significativo en la inestabilidad en comparación con los patrones de lluvia normal y retardado. A pesar de que el patrón avanzado no es el mínimo en la precipitación de 624 mm. es el que más rápido afecta al talud en este tipo de suelo. Para todos los demás casos el patrón avanzado fue el mínimo obteniendo valores de 1.521 a los 5.37 días en la precipitación de 312 mm y 1.457 a los 2.16 días en la precipitación de 1248 mm.
- Se comprobó cómo el comportamiento de los factores de seguridad tiende a ser iguales para las precipitaciones de lluvias bajas. En el caso de la precipitación de 312mm el comportamiento de los factores para el patrón retardo y normal son relativamente similares.
- Se determinó un orden en cuanto a la variación inicial de los factores de seguridad en todas las precipitaciones. El patrón de lluvia avanzado empieza a variar con el tiempo de una forma más rápida hasta alcanzar su FS mínimo. El patrón de lluvia normal es el segundo que varía más rápido con el tiempo hasta obtener su FS. mínimo. Por último, se encuentra el patrón retardado.
- Las presiones de poro ayudaron a este proceso, pues el patrón avanzado muestra un rango de aumento en las presiones que van de 0 a 40.3 KPa para profundidades hasta los 15 m en el día 1 en la lluvia de 1248 mm. Mientras que para los patrones retardado y normal varía de 0 a 41 kPa y 0 a 42 kPa para profundidades de 7m y 8m en el día 1. Este proceso es similar para las lluvias de 312mm y 624mm.

- Se comprobó que, en el proceso de estabilización natural del talud en este tipo de suelos, los patrones normal y retardado muestran una mejor recuperación pues sus pendientes de recuperación van desde 0.020% a 0.032%. mientras los patrones avanzados tienen pendientes más suaves que van desde 0.019% hasta 0.028%.
- Las presiones de poro aumentaron considerablemente a la altura del nivel freático entre los 10 m y 12 m para las lluvias de 1248 mm. Por este motivo el nivel freático tuvo variaciones de 1.5 m y 1.8 m durante los días 4 y 5. Durante los siguientes días el nivel freático se restableció.
- Se observó que las presiones de poro al término del proceso de estabilización programado para 23 días aproximados. No alcanzaron las presiones iniciales, pero continúan estableciéndose en el tiempo.

Recomendaciones en INFLUENCIA DE LAS LLUVIAS ANTECEDENTES EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN UN SUELO LATERÍTICO DE JAMUNDÍ (VALLE DEL CAUCA)

- Se comprobó que los efectos de estabilidad en suelos lateríticos por efecto de las lluvias antecedentes impactan en proporción para diferentes patrones de lluvia y diferentes cantidades. Se recomienda el uso de lluvias alternativas para evaluar problemáticas de inestabilidad en otro tipo de suelos. Este tipo de estudios son pertinentes para evacuar problemáticas relacionadas con el cambio climático y el incremento de las precipitaciones mostradas en la figura 6.
- Se recomienda realizar diferentes variaciones en los niveles freáticos para determinar el impacto de las lluvias en función del nivel freático.
- Se pueden realizar ensayos de laboratorio más detallados para determinar una caracterización más adecuada de las propiedades geomecánicas. Aunque se debe tener en cuenta la propiedad anisotrópica de los suelos.

6. Referencias bibliográficas

- ACOSTA, N. P. L., & PROMOTOR, J. A. M. (2016). Flujo de agua en suelos parcialmente saturados y su aplicación a la ingeniería geotécnica. Serie de Investigación y Desarrollo (SID), (698).
- Alfaro, M. (2008). Geotecnia en suelos no saturados. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 32(125). 471-481, 2008. ISSN 0370-3908.
- Apaza Quispe, E. M (2019). Análisis de intensidades de precipitaciones pluviales para paralización de obras civiles en estaciones meteorológicas de El Alto-Aeropuerto e Irpavi (Doctoral dissertation).
- CMGRD. (2013). Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD). Segunda versión – Revisión 04. Municipio de Jamundí, Valle del Cauca, Colombia.
- Das, B. (2015). Fundamentos de ingeniería geotécnica. CENCAGE Learning, Ciudad de México.
- De Desarrollo, B. I. (2011). *Indicadores de riesgo de desastre y gestión de riesgos: Programa para América Latina y el Caribe: El Salvador* (No. 46338). Inter-American Development Bank.
- Deslizamientos@nasa. (2023). ¿Por qué estamos viendo deslizamientos de tierra? Obtenido de: <https://gpm.nasa.gov/landslides/about.html>
- Fresneda Saldarriaga, C. A. (2019). Elaboración de la curva de retención de agua de algunos suelos a partir de propiedades índice.

- GIDIGASU, M. Laterite soil engineering, Pedogenesis and engineering principles. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.
- Estacio, K. (2022). Declaran alerta roja en el valle por deslizamientos tras lluvias. Obtenido de: <https://www.radionacional.co/regiones/valle/lluvias-en-valle-declaran-alerta-roja-por-deslizamientos>.
- Genovés Muñoz, D. G. (2018). Análisis de precipitaciones y elaboración de hietogramas de diseño para la ciudad de Cuenca (Bachelor's thesis, UniVersidad del Azuay).
- Gómez C. & Rodríguez F. (2022). El 80% de la población está amenazada por deslizamientos en Colombia. Obtenido de: www.elespectador.com/colombia/el-80-de-la-poblacion-amenazada-por-deslizamientos-en-colombia/
- GEO-SLOPE International Ltd. (2012). Seepage Modeling with SEEP/W. An Engineering Methodology.
- Guardado Lacaba, R. (2026), Geotecnia de los suelos lateríticos y su incidencia en los riesgos geodinámicos. Jornada Iberoamericana de riesgos por inundación y desastres naturales AECI/CYTED. Antigua de Guatemala del 5 al 9 de junio de 2006.
- Hidalgo, C., Muñoz, F., Urrego, P., Londoño, V., & Mateus, B. (2016). Evaluación del efecto de la infiltración de agua sobre la estabilidad de un talud en suelos residual. Universidad de Medellín, Colombia.
- IDEAM, (2023). Consulta y descarga de datos hidrometeorológicos. Obtenido de. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- INGEOMINAS, (1984). Reseña explicativa del mapa geológico preliminar plancha 299 Jamundí, escala 1:100.000 Bogotá

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC), (2023). Región andina sería la más azotada por lluvias. Obtenido de <https://igac.gov.co/es/noticias/region-andina-seria-la-mas-azotada-por-los-derrumbes-en-temporada-de-lluvias-igac>

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2013). Norma y especificaciones invias 2013. Bogotá D.C.

Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, (2021). Summary for Policymakers. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001.

Kim, S. W., Chun, K. W., Kim, M., Catani, F., Choi, B., & Seo, J. I. (2021). Effect of antecedent rainfall conditions and their variations on shallow landslide-triggering rainfall thresholds in South Korea. *Landslides*, 18, 569-582.

López-Acosta, N. P., & Mendoza-Promotor, J. A. (2016). Funciones hidráulicas del suelo y su influencia en los análisis numéricos de flujo de agua saturado y no saturado.

Meza Ochoa, V. E. (2012). Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (31), 23-38.

Miranda, F. (2022). Derrumbes afectan zona rural de Jamundí. obtenido de: www.portafolio.co/economia/finanzas/derrumbes-afectan-zona-rural-jamundi-188926.

Montero Olarte, J. (2017). Clasificación De Movimientos En Masa Y Su Distribución En Terrenos Geológicos De Colombia. Bogotá DC: Publicaciones Especiales Geológicas. Recuperado a partir de <https://www2.sgc.gov.co/Archivos/Clasificación.Pdf>

- Moreno-Ramírez, H. A., Vélez-Otálvaro, M. V., Montoya, J. D., & Rhenals-Garrido, R. L. (2014). La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria.
- Ospina, L. (2021). Riesgos en ambientes montañosos: Movimientos en masa. Universidad del valle. Santiago de Cali. Colombia.
- Rahimi, A., Rahardjo, H., & Leong, E. C. (2011). Effect of antecedent rainfall patterns on rainfall-induced slope failure. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 137(5), 483-491.
- TIBOSASA; M., & Tatiana, A. (2018). Análisis de la utilización de las lateritas como materiales en estructuras de pavimento para su aprovechamiento en Colombia.
- Sondon Sansó, M. (2016). Efectos osmóticos en el hinchamiento de arcillas. Las Lutitas de Balanzas (Master's thesis, UniVersitat Politècnica de Catalunya).
- Sagitaningrum, F. H., & Bahsan, E. (2017). Parametric study on the effect of rainfall pattern to slope stability. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 101, p. 05005). EDP Sciences.
- SGC, (2017). Las amenazas por movimientos en masa en Colombia una visión a escala 1:100.000. ISBN 978-958-99528-8-7, Bogotá D.C. Colombia.
- Valencia, O. & Rosales, G. (2011). Inestabilidad de un talud vía interna parcelación colinas de Miravalle, municipio de Jamundí, Valle del Cauca. Santiago de Cali. Colombia.
- Vallejo, G., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C.,(2002), *Ingeniería Geológica*, Pearson educación ,Madrid 2002.

7. Anexos.

7.1. Datos Estación San Vicente.



CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA

Dirección Técnica Ambiental

Grupo Recursos Hídricos - Red de

ESTACIÓN: SAN VICENTE
CÓDIGO: 2622100103
CUENCA: Jamundí
DEPARTAMENTO: Valle del Cauca
MUNICIPIO: JAMUNDÍ
CORREGIMIENTO: San Vicente
COORD. ESTE: 1050137,33
COORD. NORTE: 853301,28
ALTURA: 1442
CATEGORÍA: Pluviográfica
ENTIDAD: CVC
FECHA INICIO: 01/05/1971

PRECIPITACIÓN TOTAL DIARIA (mm)

AÑO 2020

DÍA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1											0	38
2											0	6
3											0	0
4											4	0
5											0	9
6											0	0
7											0	0
8											0	8
9											0	0
10											9	4
11											21	16
12										0	0	8
13										4	65	0
14										0	4	0
15										0	7	7
16										0	19	0
17										18	0	0
18										44	12	0
19										6	20	5
20										0	24	30
21										0	0	0
22										0	0	0
23										9	0	0
24										0	0	39
25										0	4	99
26										0	59	16
27										4	12	15
28										7	0	12
29										9	15	26
30										16	0	0
31										39		4
MAXIMA										44	65	99
N.D.	0<	0<	0<	0<	0<	0<	0<	0<	0<	10	14	17
PROMEDIOS										8	9	11
TOTAL										156	275	342

TOTAL ANUAL	773
MÁXIMA DIARIO	99
PROMEDIO	9
TOTAL N.D.	41

***< = No Hay Dato Vacío = No Aplica
< = Dato Incompleto N.D. = Número Días de Lluvia
-- = Dato Acumulado

Fecha y Hora de Impresión: 23/03/2023 01:51 PM

Página 1 de 2

Datos extraídos estación San Vicente. Fuente: CVC (2023)



CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA

Dirección Técnica Ambiental

Grupo Recursos Hídricos - Red de Monitoreo

ESTACIÓN: SAN VICENTE
 CÓDIGO: 2622100103
 CUENCA: Jamundi
 DEPARTAMENTO: Valle del Cauca
 MUNICIPIO: JAMUNDÍ
 CORREGIMIENTO: San Vicente
 COORD. ESTE: 1050137,33
 COORD. NORTE: 853301,28
 ALTURA: 1442
 CATEGORÍA: Pluviográfica
 ENTIDAD: CVC
 FECHA INICIO: 01/05/1971

PRECIPITACIÓN DIARIA MÁXIMOS (mm)

AÑO 2021

DÍA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	0	8	92									
2	0	0	17									
3	12	0	18									
4	43	0	11									
5	24	0	0									
6	74	0	0									
7	0	0	3									
8	0	9	5									
9	0	21	19									
10	14	0	39									
11	63	0	18									
12	0	8	42									
13	0	14	11									
14	0	6	18									
15	0	0										
16	0	0										
17	0	22										
18	0	62										
19	0	8										
20	0	11										
21	0	6										
22	7	9										
23	15	0										
24	0	6										
25	0	21										
26	0	23										
27	0	18										
28	0	19										
29	0											
30	0											
31	0											
MAXIMA	74,0	62,0	92,0									
N.D.	8	17	12	0,0<	0,0<	0,0<	0,0<	0,0<	0,0<	0,0<	0,0<	0,0<
TOTAL	252,0	271,0	293,0									
TOTAL ANUAL	816,0											
MÁXIMA DIARIO	92,0											
PROMEDIO ANUAL	33,3											

***< = No Hay Dato
 < = Dato Incompleto
 + = Dato Acumulado

Vacio = No Aplica
 N.D. = Número Días de Lluvia

Fecha y Hora de Impresión: 17/06/2024 07:38 PM

Página 1 de 1

Datos extraídos estación San Vicente. Fuente: CVC (2023)

7.2. Registro fotográfico



Verificación estratigrafía zona corona de talud. Fuente: Diaz (2022)



Extracción de muestra en pie de talud. Fuente: Diaz (2023)



Preparación de muestras para ensayos de laboratorio. Fuente: Diaz (2023)

7.3. Ensayos realizados

LIMITE LIQUIDO

# DE GOLPES	36	21	18	
Peso 1 (g)	33.07	31.11	31.09	
Peso 2 (g)	28.84	27.41	26.22	
Peso 3 (g)	18.29	18.91	15.23	
% Humedad	40.1	43.5	44.3	

LIMITE PLASTICO

H.NAT.

Peso 1 (g)	20.07	27.34		250.10
Peso 2 (g)	18.49	25.67		204.24
Peso 3 (g)	12.52	19.37		36.75
% Humedad	26.5	26.5		27.4

LIMITE

LIQUIDO:

42.0

LIMITE PLASTICO

26.5

ÍNDICE DE PLASTICIDAD

15.5

HUMEDAD

NATURAL.

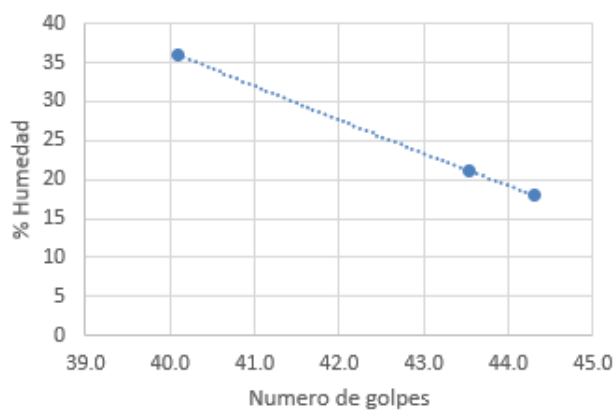
27.4

ÍNDICE DE

LIQUIDEZ:

0.1

limites de atterberg



CLASIFICACION

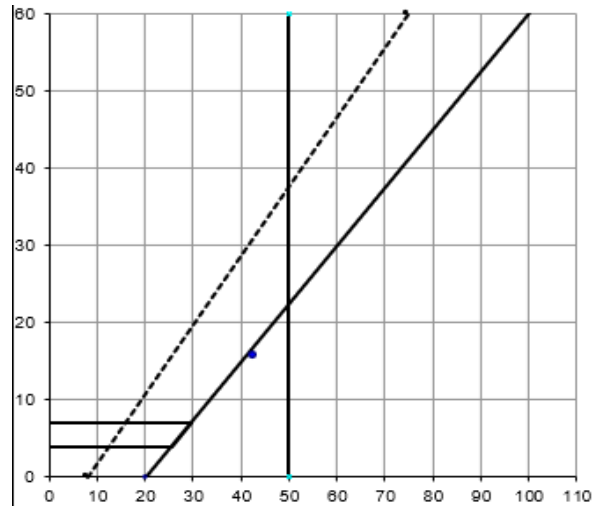
A A S H T O

(I.G.):

A-7-6 (18)

U. S. C. S.:

ML



PRUEBA DE CORTE DIRECTO CONDICIÓN CONSOLIDADA DRENADA

Prueba #	γ_t (g/cm ³)	% Humedad	σ_N (Kg/cm ²)	τ (Kg/cm ²)
1	1.84	20.6	0.51	0.61
2	1.84	20.9	1.02	0.86
3	1.81	20.6	2.04	1.28
4	1.81	20.6	4.08	2.59

m	0.5556	Cohesión		
$\tan^{-1}$	0.507	Kg/cm ²	kPa	ton/m ²
ϕ (Grados)	29	0.27	26.7	2.67

