

**Análisis probabilístico de estabilidad de taludes con falla planar en la comuna
universitaria, de la ciudad de Manizales, Colombia**

Autor:

Diana Carolina Arias Valencia

Director:

Jorge Alonso Aristizábal Arias

Trabajo de grado (tesis) presentado como requisito para la obtención del título de:

Magíster en Ciencias de la Tierra

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Universidad de Caldas

Septiembre de 2021

Tabla de contenido

Resumen

1. Resumen	17
2. Introducción	18
2.1. Objetivos	31
2.1.1. Objetivo general.....	31
2.1.2. Objetivos específicos	31
3. Marco geológico	32
3.1. Geología regional	32
3.2. Geología local	37
3.3. Geomorfología	40
3.4. Condiciones de lluvia	42
4. Fundamento teórico	43
4.1. Talud	43
4.2. Deslizamientos	45
4.3. Tipos de deslizamientos	46
4.3.1. Volcamiento.....	47
4.3.2. Reptación (<i>Creep</i>).....	47
4.3.3. Rotacional y planar	48
4.3.4. Propagación o extensión lateral	52
4.3.5. Hundimientos.....	53
4.3.6. Flujos.....	54
4.4. Parámetros físicos y mecánicos de los suelos usados en los análisis de estabilidad	55

4.4.1.	Parámetros físicos	55
4.4.2.	Parámetros mecánicos.....	58
4.4.3.	Ensayos directos para obtención de parámetros mecánicos	60
4.4.4.	Ensayos indirectos para obtención de parámetros mecánicos	64
4.5.	Análisis de estabilidad de taludes	65
4.5.1.	Métodos determinísticos para análisis de estabilidad de taludes	65
4.5.2.	Método de talud infinito probabilidad de falla	66
4.5.3.	Métodos probabilísticos para análisis de estabilidad de taludes.....	69
4.5.4.	Método de primer orden segundo momento (FOSM).....	70
4.5.5.	Método de estimativas puntuales	70
4.5.6.	Probabilidad de falla	71
4.5.7.	Método de Monte Carlo	72
4.6.	Conceptos de probabilidad y estadística para tratamiento de datos usados en los análisis de estabilidad	73
4.6.1.	Variable estadística	74
4.6.2.	Variable continua	75
4.6.3.	Valor medio muestral.....	75
4.6.4.	Varianza muestral	75
4.6.5.	Coeficiente de variación muestral.....	76
	Coeficiente de asimetría	76
4.6.6.	Covarianza	77
4.6.7.	Distribuciones de probabilidad	77
4.6.8.	Distribución Gamma.....	78
4.6.9.	Distribución Exponencial.....	78
4.6.10.	Distribución normal	79
4.6.11.	Distribución log normal	79

4.6.12.	Valor esperado	81
4.6.13.	Función de densidad de probabilidad	81
4.6.14.	Función de distribución acumulada	82
4.6.15.	Método de máxima verosimilitud	82
4.6.16.	Pruebas de normalidad.....	83
4.6.17.	Test de Cramer-von Mises	83
4.6.18.	Test de Kolmogórov-Smirnov	84
4.6.19.	Criterios para la clasificación del factor de seguridad y probabilidad de falla	85
5.	Metodología	87
5.1.	Recopilación de información, Parámetros de campo y laboratorio	87
5.2.	Tratamiento estadístico a las variables	88
5.3.	Obtención de distribución de probabilidad de las variables	88
5.4.	Cálculo del factor de seguridad y probabilidad de falla.....	89
6.	Análisis de resultados	89
6.1.	Parámetros geotécnicos.....	89
6.2.	Tratamiento estadístico de las propiedades físicas y mecánicas.....	94
6.3.	Verificación de Ajuste de las distribuciones de probabilidad	95
6.4.	Función de densidad y ajuste de la distribución de probabilidad acumulada	98
6.5.	Determinación de la probabilidad de falla mediante la simulación de Montecarlo	101
6.5.1.	Altura del estrato blando	101
6.5.2.	Altura del nivel de aguas freáticas	102
6.5.3.	Ángulos de inclinación característicos del sector	102
6.5.4.	Coficiente sísmico horizontal.....	103
6.5.5.	Método Montecarlo taludes nivel de aguas freáticas 0%, alturas estrato blando 1.0 a 9.0 m	106

6.5.6.	Método Montecarlo taludes nivel de aguas freáticas 50%, altura de estrato blando 1.0 a 9.0 m	113
6.5.7.	Método Montecarlo taludes nivel de aguas freáticas 100% y alturas estrato blando 1.0 a 9.0 m	120
7.	Estudio de caso	127
7.1.	Localización de la zona de estudio	127
7.2.	Evento ocurrido en el sector	130
7.3.	Registro fotográfico del sector	131
7.4.	Geología local	132
7.5.	Formaciones superficiales	134
7.6.	Clasificación geotécnica de los materiales	136
7.7.	Topografía del sector	136
7.8.	Análisis retrospectivo de estabilidad de taludes	138
7.8.1.	Análisis de estabilidad de taludes retrospectivo condición con sismo y nivel de aguas freáticas del 0%.	139
7.8.2.	Análisis de estabilidad de taludes retrospectivo condición con sismo y nivel de aguas freáticas del 50% de estratos blandos.	144
7.8.3.	Análisis de estabilidad de taludes retrospectivo condición con sismo y nivel de aguas freáticas 100% de estratos blandos.	149
7.8.4.	Resultados análisis retrospectivo de estabilidad de taludes	154
8.	Conclusiones	155
9.	Bibliografía	163
10.	Anexos	173
10.1.	Anexo función de probabilidad Normal y Log Normal	173
10.2.	Bondad de ajuste Komogórov Smirnov peso unitario húmedo	176
10.3.	Bondad de ajuste Komogórov Smirnov cohesión	179
10.4.	Bondad de ajuste Komogórov Smirnov ángulo de fricción	181

10.5. Anexo síntesis método de Montecarlo 5000 iteraciones altura de agua del 0%.	184
10.6. Anexo síntesis método de Montecarlo 5000 iteraciones altura de agua del 50%.	218
10.7. Anexo síntesis método de Montecarlo 5000 iteraciones altura de agua del 100%.	253
10.8. Anexo modelación 5000 iteraciones altura de agua del 0%.	287
10.9. Anexo modelación 5000 iteraciones altura de agua del 0%.	287
10.10. Anexo modelación 5000 iteraciones altura de agua del 0%.	287

Lista de figuras

Figura 1.	Mapa de localización general	20
Figura 2.	Panorámica de la comuna Universitaria,	21
Figura 3.	Gráfica evidencia deslizamiento barrio Pio XII	22
Figura 4.	Imagen periódico -deslizamiento sectores Fátima.....	23
Figura 5.	Imagen periódico -deslizamiento barrio Fátima	24
Figura 6.	Recorte boletín informativo inversión gestión del riesgo Manizales	25
Figura 7.	Imagen periódico -deslizamiento barrio Kennedy.....	26
Figura 8.	Imagen periódico -Participación ciudadana barrio Pio XII	27
Figura 9.	Recorte periódico -deslizamientos Aranjuez y Camilo Torres.....	28
Figura 10.	Recorte periódico -deslizamientos Aranjuez	29
Figura 11.	Recorte periódico -deslizamientos Aranjuez	30
Figura 12.	Modificado de Mapa geológico generalizado de Caldas,	35
Figura 13.	Modificado de plano D-2D-Mapa formaciones superficiales.....	39
Figura 14.	Mapa de pendientes características.....	41
Figura 15.	Características de los taludes (modificado de Suarez, 2004).....	44
Figura 16.	Partes que conforman los movimientos en masa o deslizamientos (modificado de Suarez, 2004)	45
Figura 17.	Proceso de falla al volcamiento (modificado de Suarez, 2004).....	47
Figura 18.	Diagrama que ilustra un proceso de reptación (modificado de Suarez, 2004)	48
Figura 19.	Deslizamiento de rotación en una ladera (modificado de Suarez, 2004).....	49
Figura 20.	Deslizamiento de traslación en una ladera (modificado de Suarez, 2004)	50
Figura 21.	Ejemplos de deslizamiento de traslación en una ladera.....	52
Figura 22.	Representación fenómeno extensión lateral (modificado de Suarez, 2004)	52
Figura 23.	Representación fenómeno hundimiento (modificado de Suarez, 2004)	53
Figura 24.	Representación fenómeno de flujos. (A) Flujo de rocas, (B)	54
Figura 25.	Gráfica de Trayectoria de esfuerzos en un ensayo de corte directo para condiciones drenadas y no-drenadas (Duncan & Wrigth, 2005).	59
Figura 26.	Graficas típicas de ensayo triaxial (Tomado de (Das, n.d.)	62

Figura 27.	Graficas típicas de ensayo compresión simple .	63
Figura 28.	Grafica análisis de un talud infinito, esfuerzos sobre un elemento de suelo.	67
Figura 29.	Distribución de frecuencias del factor de seguridad (Christian et al., 1994).	71
Figura 30.	Graficas tipo de asimetría de una distribución de probabilidad.	76
Figura 31.	Graficas función de probabilidad y función de probabilidad acumulada	81
Figura 32.	Función Normal y Log Normal ajustada al parámetro peso unitario húmedo.	98
Figura 33.	Función de probabilidad acumulada del peso unitarios	99
Figura 34.	Función Normal y Log Normal ajustada al parámetro cohesión	99
Figura 35.	Función de probabilidad acumulada de la cohesión	100
Figura 36.	Función Normal y Log Normal ajustada al parámetro ángulo de fricción.	100
Figura 37.	Función de probabilidad acumulada del ángulo de fricción	101
Figura 38.	Gráficas FS medio - espesor de la masa deslizando NAF 0%	109
Figura 39.	Factor de seguridad- ángulo de inclinación del talud NAF 0%	110
Figura 40.	Probabilidad de falla – Espesor masa deslizando, NAF 0%	111
Figura 41.	Probabilidad de falla – Ángulo de inclinación NAF 0%.	112
Figura 42.	Gráficas FS medio - espesor de la masa deslizando NAF 50%.	116
Figura 43.	Factor de seguridad - ángulo de inclinación del talud, NAF 50%	117
Figura 44.	Probabilidad de falla – Espesor de la masa deslizando, NAF 50%.	118
Figura 45.	Probabilidad de falla – Ángulo de inclinación, NAF 50%.	119
Figura 46.	Gráficas FS medio - espesor de la masa deslizando, NAF 100%	123
Figura 47.	Factor de seguridad - ángulo de inclinación comuna Universitaria NAF100% ...	124
Figura 48.	Probabilidad de falla – Espesor de la masa deslizando comuna NAF 100%.	125
Figura 49.	Probabilidad de falla – Ángulo de inclinación NAF 100%.	126
Figura 50.	Localización general del sector analizado dentro de la comuna Universitaria.....	128
Figura 51.	Localización específica para análisis retrospectivo sector Aguacate de la comuna Universitaria.	129
Figura 52.	Registro fotográfico sitio inestable sector Aguacate de la comuna Universitaria.	131
Figura 53.	Mapa geológico sector Aguacate de la comuna Universitaria (Fuente propia)....	133
Figura 54.	Mapa formaciones superficiales sector Aguacate de la comuna Universitaria.....	135
Figura 55.	Topografía y perfil típico del sector (Tomado del archivo de la empresa Quasar ingenieros consultores s.a.s)	137

Figura 56.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.	185
Figura 57.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.	186
Figura 58.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.	188
Figura 59.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.	188
Figura 60.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.	190
Figura 61.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.	190
Figura 62.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.	192
Figura 63.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.	192
Figura 64.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.	194
Figura 65.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.	194
Figura 66.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.	196
Figura 67.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.	196
Figura 68.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.	198
Figura 69.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.	198
Figura 70.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.	200
Figura 71.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.	200
Figura 72.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.	202
Figura 73.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.	202
Figura 74.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.	204
Figura 75.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.	204
Figura 76.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.	206
Figura 77.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.	206
Figura 78.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.	208
Figura 79.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.	209
Figura 80.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.	210
Figura 81.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.	211
Figura 82.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.	212
Figura 83.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.	213
Figura 84.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.	214
Figura 85.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.	215
Figura 86.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.	216

Figura 87.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud	217
Figura 88.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.	219
Figura 89.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.	220
Figura 90.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.	221
Figura 91.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.	222
Figura 92.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.	223
Figura 93.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.	224
Figura 94.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.	225
Figura 95.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.	226
Figura 96.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.	227
Figura 97.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.	228
Figura 98.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.	229
Figura 99.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.	230
Figura 100.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	231
Figura 101.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	232
Figura 102.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	233
Figura 103.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	234
Figura 104.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	235
Figura 105.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	236
Figura 106.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	237
Figura 107.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	238
Figura 108.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	239
Figura 109.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	240
Figura 110.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	241
Figura 111.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	242
Figura 112.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	243
Figura 113.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	244
Figura 114.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	245
Figura 115.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	246
Figura 116.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	247
Figura 117.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	248

Figura 118.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	249
Figura 119.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	250
Figura 120.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	251
Figura 121.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	252
Figura 122.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	254
Figura 123.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	255
Figura 124.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	256
Figura 125.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	257
Figura 126.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	258
Figura 127.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	259
Figura 128.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	260
Figura 129.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	261
Figura 130.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	262
Figura 131.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	263
Figura 132.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	264
Figura 133.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	265
Figura 134.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	266
Figura 135.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	267
Figura 136.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	268
Figura 137.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	269
Figura 138.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	270
Figura 139.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	271
Figura 140.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	272
Figura 141.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	273
Figura 142.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	274
Figura 143.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	275
Figura 144.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	276
Figura 145.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	277
Figura 146.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	278
Figura 147.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	279
Figura 148.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	280

Figura 149.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	281
Figura 150.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	282
Figura 151.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	283
Figura 152.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	284
Figura 153.	Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.....	285
Figura 154.	Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.....	286

Lista de tablas

Tabla 1.	Nomenclatura para depósitos volcánicoclásticos en la Formación Casabianca.....	36
Tabla 2.	Clasificación de movimientos en masa (modificado de Varnes, 1978).	46
Tabla 3.	Algunas distribuciones probabilísticas de parámetros geotécnicos.....	80
Tabla 4.	Niveles de significancia Kolmogórov	84
Tabla 5.	Clasificación de la amenaza de un talud ante un deslizamiento (USACE,1999).....	85
Tabla 6.	Clasificación de la amenaza de un talud ante un deslizamiento.....	86
Tabla 7.	Criterio para la clasificación de la amenaza en función de la probabilidad de falla. .	87
Tabla 8.	Parámetros físicos, mecánicos en condiciones no drenadas y espesores de estratos blandos Comuna Universitaria de Manizales	90
Tabla 9.	Resultados tratamiento estadístico de las variables.....	94
Tabla 10.	Resultados estadísticos de Cramér-von Mises y estadístico de Kolmogórov Smirnov, a partir de la evaluación de máxima verosimilitud.	95
Tabla 11.	Resultados estadísticos de Cramér-von Mises y estadístico de Kolmogórov Smirnov, a partir de la evaluación de máxima verosimilitud.	96
Tabla 12.	Resultados estadísticos de Cramér-von Mises y estadístico de Kolmogórov Smirnov, a partir de la evaluación de máxima verosimilitud.	96
Tabla 13.	Valores p hallados a partir del test de Cramér-von Mises y test de Kolmogórov Smirnov	97
Tabla 14.	Valores de Aa y Av para Manizales (Tomado de Tabla A2.3-2 NSR-10)	103
Tabla 15.	Valores de Fa y Fv (Tomado de, Tablas 2.4-3 y 2.4.4 de NSR-10)	104
Tabla 16.	Clasificación de la amenaza de un talud ante un deslizamiento	105
Tabla 17.	Criterio para la clasificación de la amenaza en función de la probabilidad de falla.	105
Tabla 18.	Parámetros de entrada método Montecarlo.....	106
Tabla 19.	Nivel de amenaza en función del factor de seguridad medio, en los taludes de la comuna Universitaria	107
Tabla 20.	Resultados niveles de amenaza en función de la probabilidad de falla para la Comuna Universitaria	108

Tabla 21.	Parámetros de entrada método Montecarlo.....	113
Tabla 22.	Nivel de amenaza en función del factor de seguridad medio en los taludes de la comuna Universitaria, NAF 50%.....	114
Tabla 23.	Resumen resultados probabilidad de falla, espesor masa deslizante vs ángulo de inclinación NAF 50%.	115
Tabla 24.	Parámetros de entrada método Montecarlo.....	120
Tabla 25.	Niveles de amenaza en función del Factor de seguridad medio de los taludes de la comuna Universitaria, NAF 100%.....	121
Tabla 26.	Resumen resultados probabilidad de falla, espesor masa deslizante vs ángulo de inclinación masa deslizante.....	122
Tabla 27.	Registro Horario de Precipitaciones. Estación Meteorológica Posgrados.....	130
Tabla 28.	Resultado del tratamiento estadístico de las variables peso unitario, cohesión y ángulo de fricción.	136
Tabla 29.	Resultados factor de seguridad mínimo análisis retrospectivo	154
Tabla 30.	Función de probabilidad Normal y Log Normal.....	173
Tabla 31.	Bondad de ajuste Kolmogórov -Smirnov peso unitario húmedo.....	176
Tabla 32.	Bondad de ajuste Kolmogórov -Smirnov cohesión	179
Tabla 33.	Bondad de ajuste Kolmogórov -Smirnov ángulo de fricción	181
Tabla 34.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=1.0m	184
Tabla 35.	Resúmenes resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=1.5m	185
Tabla 36.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=2.0m	187
Tabla 37.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=2.5m	189
Tabla 38.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=3.0m	191
Tabla 39.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=3.5m	193
Tabla 40.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=4.0m	195
Tabla 41.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=4.5m	197
Tabla 42.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=5.0m	199
Tabla 43.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=5.5m	201
Tabla 44.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=6.0m	203
Tabla 45.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=6.5m	205

Tabla 46.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=7.0m$	207
Tabla 47.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=7.5m$	210
Tabla 48.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=8.0m$	212
Tabla 49.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=8.5m$	214
Tabla 50.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=9.0m$	216
Tabla 51.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=1.0m$	218
Tabla 52.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=1.5m$	220
Tabla 53.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=2.0m$	223
Tabla 54.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=2.5m$	225
Tabla 55.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=3.0m$	227
Tabla 56.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=3.5m$	229
Tabla 57.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=4.0m$	231
Tabla 58.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=4.5m$	233
Tabla 59.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=5.0m$	235
Tabla 60.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=5.5m$	237
Tabla 61.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=6.0m$	239
Tabla 62.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=6.5m$	241
Tabla 63.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=7.0m$	243
Tabla 64.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=7.5m$	245
Tabla 65.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=8.0m$	247
Tabla 66.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=8.5m$	249
Tabla 67.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=9.0m$	251
Tabla 68.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=1.0m$	253
Tabla 69.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=1.5m$	255
Tabla 70.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=2.0m$	257
Tabla 71.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=2.5m$	259
Tabla 72.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=3.0m$	261
Tabla 73.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=3.5m$	263
Tabla 74.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=4.0m$	265
Tabla 75.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=4.5m$	267
Tabla 76.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=5.0m$	269

Tabla 77.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=5.5m$	271
Tabla 78.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=6.0m$	273
Tabla 79.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=6.5m$	275
Tabla 80.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=7.0m$	277
Tabla 81.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=7.5m$	279
Tabla 82.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=8.0m$	281
Tabla 83.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=8.5m$	283
Tabla 84.	Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=9.0m$	285

1. Resumen

El presente trabajo fue realizado en la comuna Universitaria de la ciudad de Manizales, con el fin de estimar la probabilidad de falla planar en los taludes presentes en el sector, la realización de este estudio parte de la recopilación de información de 14 años de estudios geotécnicos de la zona, el procesamiento estadístico de los datos permitió conocer la vasta variabilidad de los mismos y la asertividad del enfoque probabilístico del análisis. Así mismo por medio de análisis estadístico de datos se determinó la función de densidad y ajuste de la función de probabilidad de los variables del modelo. El método probabilístico usado fue el Método de Montecarlo, en el que a partir de la modelación de la ecuación de talud infinito se analizaron escenarios típicos de entrada para propiedades como; cohesión, ángulo de fricción, nivel de aguas freáticas e inclinación de estratos de ceniza y llenos antrópicos hallados en la zona mediante prospección. Los resultados representan una herramienta para detección de condiciones que generan probabilidades de falla en la comuna Universitaria de la ciudad de Manizales, para la modelación se usaron 5000 iteraciones para cada variable, con el fin de determinar la probabilidad de falla y su clasificación de amenaza. Adicionalmente se realiza un estudio de caso por medio de análisis retrospectivo, con el fin de modelar un talud del sector y determinar si los datos usados en la modelación guardan relación con los parámetros usados en el modelo.

2. Introducción

En Colombia, en la región central de la Cordillera Central se ubica la ciudad de Manizales (Figura 1), capital del departamento de Caldas. Manizales cuenta con una topografía montañosa y su cercanía con volcanes existentes en la cordillera (Murcia et al., 2019) permite que en las formaciones superficiales de sus taludes se encuentren depósitos de cenizas volcánicas que alcanzan espesores representativos (Herrera & Picón, 2019) Sin embargo, no sólo las cenizas volcánicas se encuentran en la estratigrafía superficial de la ciudad, también se evidencian llenos antrópicos para conformación de zonas urbanizables y vías, como se aprecia en el mapa geomorfológico publicado por (Manizales, 2017) en su POT (2017). La ciudad se divide en zonas denominadas comunas, una de las cuales, la comuna universitaria, es catalogada como de amenaza media a alta por deslizamiento (Figura 2). La comuna universitaria la componen 9 barrios; Aranjuez, Betania, Camilo Torres, Fátima, Kennedy, Las Colinas, Malhabar, Pio XII y Vivienda Popular, cabe resaltar que esta comuna es aledaña a la Universidad Nacional, Universidad de Caldas y Universidad Católica de Manizales.

En la ciudad en general, la estabilidad de taludes se ve afectada por la presencia de depósitos de ceniza o llenos antrópicos que suprayacen estratos de mayor dureza y mejores características geomecánicas tales como el Complejo Quebradagrande y la Formación Manizales. Debido a esto, en esta franja de contacto entre depósitos blandos y duros, se presentan fallas de carácter planar que generan movimientos en masa que pueden desplazar grandes volúmenes de material, estructuras o vías cimentadas en las capas de estratos blandos (Escobar & Duque, 2017).

Una falla planar o traslacional, hace referencia al tipo de falla asociado a un deslizamiento ocurrido entre depósitos blandos inconsolidados y una litología competente (Servicio Geológico Colombiano, 2017), Estos deslizamientos están controlados por discontinuidades, aunque influye también la naturaleza de los estratos, su grado de meteorización diferentes tipos de rellenos y discontinuidades (Posse, 1987). Condiciones antrópicas, geológicas, topográficas y de lluvias prolongadas, influyen también en la inestabilidad de taludes (Mergili et al., 2015).

Específicamente, el ángulo de fricción de los depósitos en sí mismos es uno de los factores más determinantes para que ocurra un deslizamiento (Suárez Díaz, 1998).

Adicionalmente, la cohesión, altura del nivel freático, también influye de manera significativa en el comportamiento de los taludes, es por esto que lo descrito anteriormente se relaciona con la pérdida de resistencia al corte y por ende la pérdida de confinamiento de un talud. Finalmente, el peso unitario, espesor del depósito y además la inclinación de la litología competente, inciden en la ocurrencia de un evento de este tipo.

Este trabajo muestra los resultados de correlacionar las condiciones que influyen en la ocurrencia de movimientos en masa que presentan tipo de falla planar por medio del análisis probabilístico de Montecarlo, analizando la ecuación de talud infinito. Adicionalmente, se presenta la incidencia de la variación de los parámetros que se analizan a través del cálculo del factor de seguridad. Finalmente, se discute la importancia de incorporar métodos probabilísticos en el análisis de estabilidad de taludes para zonas específicas.

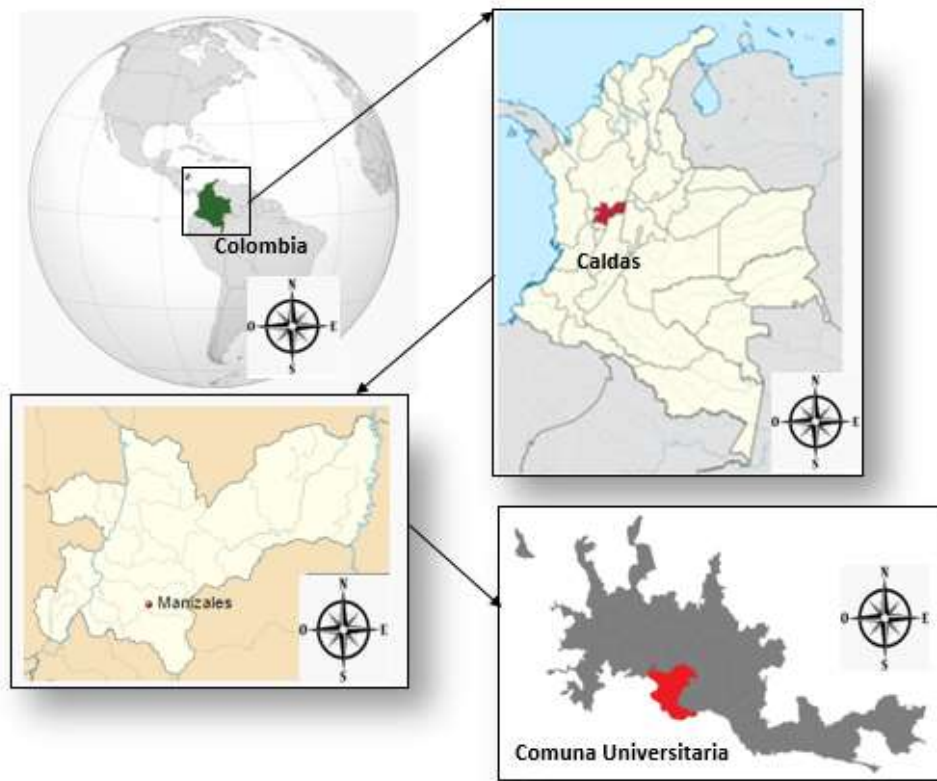


Figura 1. Mapa de localización general
(Modificado de Addicted04, 2015- Shadowxfox, 2011- IGAC, 2014)



Figura 2. Panorámica de la comuna Universitaria,
Fotografía tomada del archivo de la empresa Quasar ingenieros consultores.

- **Registro de deslizamientos en la comuna Universitaria**

Con el fin de evidenciar los deslizamientos de tipo planar en la comuna Universitaria, se realizó la recopilación de algunas evidencias documentales, que permitieran conocer el registro de algunos eventos ocurridos en la ciudad y específicamente en la zona analizada.

En la (Figura 3) se presenta un deslizamiento ocurrido en el año 2017, en el sector de la carrilera ubicado dentro del barrio Pio XII perteneciente a la comuna Universitaria, en la imagen se evidencia un movimiento planar del material y su característica de material superficial desprendido, adicionalmente se registra colapso de 18 viviendas en este sector. De acuerdo con el registro periodístico este deslizamiento fue detonado por intensas lluvias durante el día anterior al deslizamiento.



Figura 3. Gráfica evidencia deslizamiento barrio Pio XII
Tomado de (Periódico La Patria Manizales, 2017)

En la (Figura 4) se presenta un deslizamiento ocurrido en el año 2016, en el sector el aguacate ubicado dentro del barrio Fátima perteneciente a la comuna Universitaria, en la imagen se evidencia la orden de evacuación de todo este sector debido a la condición de riesgo en la que se encuentran las viviendas debido a la amenaza causada por posibles deslizamientos de ladera.



Figura 4. Imagen periódico -deslizamiento sectores Fátima
Tomado de (RCN radio, 2016)

En la (Figura 5) se evidencia un deslizamiento ocurrido en el año 2016 en el barrio Fátima aledaño a la Universidad de Caldas, facultad de ciencias agropecuarias, perteneciente a la comuna Universitaria, en la imagen se evidencia un movimiento planar del material y su afectación principal consiste en el desprendimiento de árboles que ocasiona cierre de la vía.



LA PATRIA | Manizales

Debido a un deslizamiento de tierra de mediana magnitud frente a la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Caldas, que se presentó hacia las 5:30 de la mañana de hoy, y que dejó en riesgo de caída dos árboles ubicados en la parte superior del talud, la vía estuvo cerrada durante la mañana.

Figura 5. Imagen periódico -deslizamiento barrio Fátima
Tomado de (Periódico La Patria Manizales, 2016)

En el boletín de gestión del riesgo (Figura 6) se realiza la descripción de la inversión y realización de obras de estabilidad en los sectores Topacio, El Sacatín y alto Fátima ubicados dentro del barrio Fátima y quienes tuvieron que ser intervenidos debido a deslizamientos ocurridos a lo largo de distintas décadas y generaron afectaciones a la comunidad.

ALCALDÍA
de Manizales

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MANIZALES

GESTION DE RIESGOS / en Manizales

» Gestión de Riesgos » Aspectos Jurídicos e institucionales » Inversión »

INVERSIÓN

Este fenómeno fue muy grave en las décadas de los años 60 y 70. Ya con una población de más de 170,000 habitantes, los deslizamientos en Manizales se propagaron hacia el occidente afectando los barrios de la Francia, vía a Santa Sofía y el Topacio, El Sacatín y la ladera de la avenida Doce de Octubre. Hacia 1973 la erosión alcanzó la Avenida Santander en el sector de los Fundadores, prácticamente en el centro de la ciudad, y se empezó a afectar la periferia oriental hacia la zona de Sancancio, Alto Fátima y la conexión con las laderas del sur cercanas a los colegios INEM y San Luis y la Universidad de Caldas. Simultáneamente hubo graves deslizamientos en los taludes de la ladera nororiental, detrás del Seminario Mayor y la Universidad Católica.

Figura 6. Recorte boletín informativo inversión gestión del riesgo Manizales
Tomado de (Universidad Nacional de Colombia- Alcaldía de Manizales, 2005)

De acuerdo con lo publicado por BC Noticias (Figura 7) la Secretaria de Obras Públicas de Manizales tuvo que realizar una inversión de \$500.000.000 de pesos con el fin de mitigar el riesgo en la comuna, esta inversión se realiza durante septiembre del año 2018 a causa de fenómenos de inestabilidad que se evidenciaban en el barrio Kennedy perteneciente a la Comuna Universitaria



Figura 7. Imagen periódico -deslizamiento barrio Kennedy
Tomado de (Periódico BC Noticias, 2018)

En la (Figura 8) se evidencia un registro de una de las intervenciones sociales realizadas por la Corporación autónoma de Caldas (Corpocaldas) en sectores del Pío XII y Zafiro los cuales hacen parte de la comuna Universitaria, esta intervención dada las situaciones de inestabilidad ocurridas en años anteriores en la comuna y por la que se habían realizado obras de estabilidad, además se realizó con el fin de capacitar a la comunidad en temas relacionados con la gestión de prevención de riesgos.



Figura 8. Imagen periódico -Participación ciudadana barrio Pío XII
Tomado de (Periódico Eje 21, 2019)

Teniendo en cuenta el fuerte periodo invernal que se tuvo en abril de 2017 el periódico el Espectador (Figura 9) describe la situación que enfrentaba Manizales en su momento y las pérdidas humanas y desaparecidos a raíz de estos fenómenos de estabilidad que había sido detonado por fuertes lluvias, uno de los barrios más afectados para ese momento eran Aranjuez y Camilo Torres pertenecientes a la comuna Universitaria de Manizales.



EL ESPECTADOR
Sábado 14 De Noviembre

Suscríbete Iniciar Sesión

Nacional

[Inicio](#) / [Nacional](#) / Deslizamientos en Manizales dejan 14 muertos y 22 desaparecidos

Deslizamientos en Manizales dejan 14 muertos y 22 desaparecidos

Nacional 19 abr. 2017 - 6:44 a. m.
Por: redacción Nacional

Las fuertes lluvias han dejado afectadas las zonas Aranjuez, Camilo Torres y Bajo Persia. La Alcaldía de la ciudad activó plan de emergencia.



Continúan los estragos por la temporada de lluvias que se vive en el país. Durante la noche de este martes se registró un fuerte aguacero en la ciudad de Manizales que provocó varios deslizamientos, sobre los cuales los reportes indican que hay 14 personas muertas, 22 desaparecidas y nueve lesionadas. Además hay informes de 59 viviendas afectadas, al igual que 12 vías perjudicadas.

Figura 9. Recorte periódico -deslizamientos Aranjuez y Camilo Torres
Tomado de (El Espectador, 2017)

El deslizamiento en Aranjuez ocurrido en abril de 2017 fue descrito también por el periódico El Universal (Figura 10) en donde se evidencia el alcance de la Noticia en el país y la posición de la presidencia dada la magnitud de la situación y las pérdidas humanas derivadas de este deslizamiento.

COLPRENSA

19 de abril de 2017 09:37 PM

@ElUniversalCtg

El presidente de la República, Juan Manuel Santos, quien se encuentra en Manizales, informó que la cifra de personas muertas por el deslizamiento de esta madrugada aumentó a 17.

"La última cifra que me acaban de dar, acaba de aparecer otra persona, e infortunadamente acaba de aumentar el número a 17 muertos y 6 desaparecidos", dijo el mandatario.



Aseguró que las lluvias fueron tan intensas como jamás se había registrado en la historia de Manizales (156 milímetros). "Eso es algo en lo que debemos tener conciencia, por eso desde hace muchos días les dijimos a gobernadores y alcaldes que pongan en funcionamiento los sistemas de alertas tempranas y de gestión del riesgo".

Figura 10. Recorte periódico -deslizamientos Aranjuez
Tomado de (El Universal, 2017)

A partir de información recolectada por el Tiempo (Figura 11) a los damnificados de los eventos ocurridos en Manizales entre los que se destaca el barrio Aranjuez por su impacto y magnitud en pérdidas humanas, se evidencia que tras 6 meses de ocurridos estos fenómenos la reconstrucción y regreso de familias a sus hogares no ha sido posible, en esta noticia se destaca el impacto a la sociedad causado por fenómenos de inestabilidad.



Figura 11. Recorte periódico -deslizamientos Aranjuez
Tomado de (EL Tiempo, 2017)

2.1.Objetivos

2.1.1. Objetivo general

Realizar el análisis probabilístico de estabilidad de taludes con falla planar en la comuna universitaria, de la ciudad de Manizales.

2.1.2. Objetivos específicos

- Recopilar valores a partir de sondeos realizados en la comuna y ensayos de laboratorio, con el fin de establecer las propiedades físicas y mecánicas de los suelos allí encontrados, nivel de aguas freático, estratigrafía del talud (espesores de los estratos allí presentes).
- Realizar tratamiento estadístico de las propiedades físicas y mecánicas, principalmente de las variables halladas mediante los resultados de ensayos directos de laboratorio con el fin de determinar los rangos aceptables de variación de estos parámetros.
- Establecer la influencia de los parámetros determinantes en la ocurrencia de fallas planares de taludes de la comuna universitaria.
- Analizar la probabilidad de ocurrencia de falla mediante el cálculo de factor de seguridad del método de talud infinito y la variación de los parámetros definidos como determinantes para ocurrencia de falla planar.
- Proponer un análisis retrospectivo aplicando un estudio de caso con el fin de verificar los datos y escenarios usados para el método probabilístico de Montecarlo para el análisis de fallas planares en la Universitaria de la ciudad de Manizales.

3. Marco geológico

3.1. Geología regional

La ciudad de Manizales se encuentra ubicada en el flanco occidental de la Cordillera Central de Colombia, a menos de 20 km de la Provincia Volcano-Tectónica San Diego – Cerro Machín. Los eventos presentados en la ciudad corresponden a eventos de tipo pliniano y subpliniano (Herrera & Picón, 2019), las erupciones Plinianas y Subplinianas, se caracterizan por columnas eruptivas sostenidas y altas dando lugar a áreas extensas de depósitos de tefra (Hansell, A., & Oppenheimer, C, 2004), su actividad volcánica obedece a cambios físicos y químicos del sistema magma-agua-gas y roca (Servicio Geológico Colombiano, 2017). El estado de consolidación de los depósitos de ceniza presentes en la ciudad varía de acuerdo con el tipo y momento de dichos eventos volcánicos (Lizcano et al., 2006). En estos depósitos se pueden distinguir dos estados del suelo: inconsolidado y consolidado. Los ríos Chinchiná y Olivares que desembocan en el río Cauca, influyen en el arrastre de gran cantidad de detritos, por lo anterior los valles son profundos y las laderas cuentan con altas pendientes originando un relieve abrupto en la ciudad (Naranjo & Ríos, 1989). De acuerdo con la agrupación de formaciones definida por (Coney et al., 1980). las unidades geológicas presentes en la zona de estudio corresponden a unidades estratigráficas del terreno Cauca romeral (Figura 12), estas unidades son:

Formación Quebradagrande perteneciente al Cretáceo en la cordillera Central (Botero et al., 2018), varios autores definen esta formación como la de más edad en la zona de estudio, en esta formación las rocas las componen dos miembros; uno volcánico conformado por rocas que se localizan en una franja alargada y estrecha según (Álvarez, 1983), las rocas que conforman el miembro volcánico de esta formación son básicas entre ellas se encuentran las Espilitas, diabasas, basaltos, andesitas y rocas piroclásticas como tobas bandeadas y brechas que tienen contacto a lo largo de la falla Romeral (Botero & González, 1983). Por otro lado, el miembro sedimentario de la Formación Quebradagrande es caracterizado por (Lozano et al., 1984) como un miembro compuesto por principalmente por lutitas carbonosas y arcillosas, presentando en menor proporción grauvacas, areniscas feldespáticas, limolitas, liditas y en puntos locales bancos de caliza negra.

La formación Manizales nombrada así por (Florez, 1986), con edades que van desde el Mioceno tardío al plioceno según (Naranjo, 1988) y que en cuanto al tiempo de depositación de la formación (Naranjo & Ríos, 1989), lo definen como ocurrido en intervalos temporales de 4 a 8 millones de años. Los afloramientos de la formación aparecen entre otros lugares, al occidente de Manizales, donde la unidad presenta un escarpe de falla de más de treinta metros de altura asociado a la Falla de Romeral, la misma que define el límite entre dos provincias geológicas: una de ambiente continental y otra de ambiente oceánico en los Andes colombianos, y donde el intenso fallamiento que presenta la zona, no permite que se conozca con exactitud el espesor de la formación, por lo que en diferentes puntos de la ciudad se pueden encontrar espesores que van desde los 140 a los 80 metros. La formación Manizales ha sido descrita también por (Henaó, 2006), como conformada por un conjunto de rocas sedimentarias volcagénicas derivadas del complejo volcánico Ruiz – Tolima, litológicamente compuesta por conglomerados y areniscas fluviales, conglomerados lodosos matriz-soportados y conglomerados pumáceos, producidos como resultado del retrabajamiento de grandes cantidades de productos volcánicos depositados en los sistemas de drenaje.

Formación Casabianca, con edades que según (Thouret et al., 1985) van del plioceno temprano y corresponde a ciclos de producción y distribución de detritos volcánicos que se prolongaron hasta el Pleistoceno, de acuerdo a (Borrero P, 1993), la formación la componen un conjunto de sedimentos volcagénicos producto del flujo de escombros que tienen relación con la actividad del eje volcánico de Ruiz-Cerro Bravo, los flujo de tipo lahar depositados en el flanco Este y Oeste de las zonas medias de la cordillera central (Naranjo & Ríos, 1989). Definen que la gran mayoría de Formación Casabianca se formó como resultado de depósitos de acreción lateral en ríos de sinuosidad media con producción de litofacies Gt, Gp y Gi (Tabla 1).

Debido a la gran carga del material producido durante las erupciones volcánicas y la escasa capacidad de los flujos de los ríos por su poco volumen de agua para transportarlo, se formaron típicos flujos de escombros, que se depositaron en el pie de monte de lo que hoy es Manizales. Estos depósitos fueron afectados por diversas tasas de meteorización y medianamente retrabajados por la actividad fluvial. Dichos flujos de escombros fueron el material esencial para formar las litofacies Gm, Gms, Gm(a), Gi, Gt y Gp, características de la Formación Casabianca en el sector de Manizales. La escasez de estructuras dentro de la secuencia es debida a la destrucción de ellas durante procesos diagenéticos en los cuales se produjeron grandes cantidades de arcilla. El espesor promedio de esta secuencia en Manizales es de 50 metros y tiene un volumen aproximado de 1 Km³.

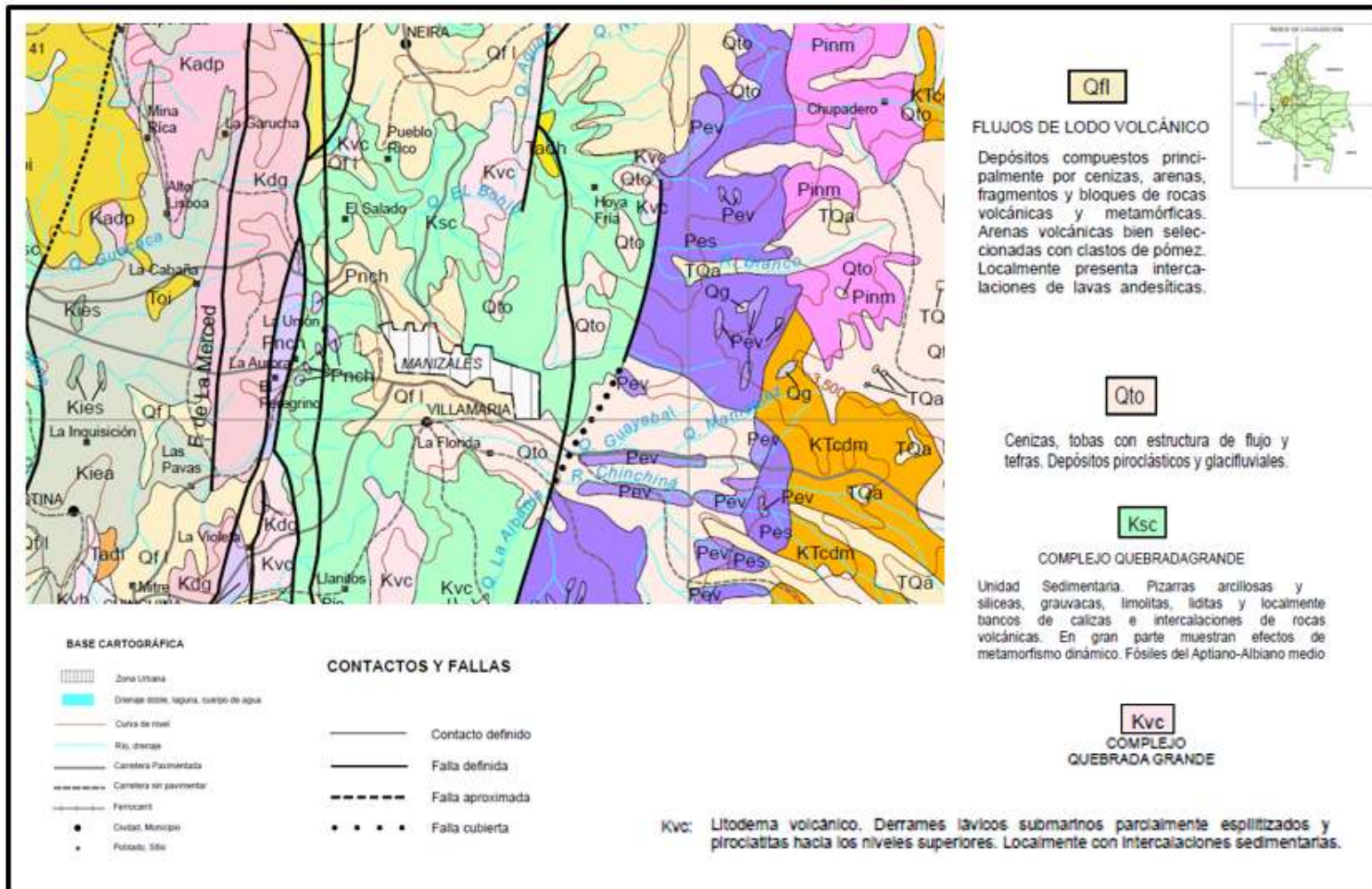


Figura 12. Modificado de Mapa geológico generalizado de Caldas, (INGEOMINAS, 1990) En la figura se evidencian las formaciones presentes en la zona de estudio.

Tabla 1. Nomenclatura para depósitos volcanoclásticos en la Formación Casabianca
(Naranjo & Ríos, 1989).

Código litofacial	Litofacies	Estructuras sedimentarias	Interpretación
GM	Identificador general para grava masiva clastosoportada		
GM (a)	Grava Masiva o crudamente estratificada. Abundante matriz arenosa, clastos pobremente sorteada, subangulares a subredondeados.	Clastos de grava orientados con ambos ejes transversos a la dirección del flujo; imbricación pobre, puede ser normalmente gradada.	Depósitos de flujos de lodo hiperconcentrados de grano grueso, depositación rápida tanto de suspensión como de tracción.
Gmu	Gravas masivas clastosoportada y no sorteadas.	Estratificación normal o inversa pobre, no presenta imbricación.	Depósitos de flujos de escombros.
Gms	Gravas masivas matriz-soportada, muy pobremente sorteadas, los clastos pueden ser angulares a subredondeados.	Posible gradación inversa en toda la capa o solamente en la base.	Depósitos de flujos de escombros.
Gt	Grava estratificada	Estratificación cruzada de artesa.	Relleno de canal
Gp	Grava estratificada	Estratificación planar, capas tabulares, solitarias o agrupadas.	Barras transversales con crestas rectas
Gi	Grava estratificada	Estratificación inclinada de bajo ángulo.	Superficies de acreción lateral.

3.2. Geología local

De acuerdo con la información consignada en el mapa de formaciones superficiales (Figura 13) los depósitos de caída piroclástica pueden cubrir el 30% de la superficie de la zona urbana de la capital del departamento de Caldas y se encuentran específicamente en la estratigrafía superficial de la comuna Universitaria (Alcaldía de Manizales, 2017) a. estos depósitos fueron descritos por (Naranjo & Ríos, 1989) como manifestaciones recientes de la actividad volcánica explosiva del complejo volcánico Ruiz-Tolima, estos depósitos se presentan en forma de mantos delgados cubriendo las demás formaciones, los depósitos de ceniza en la ciudad de Manizales van desde fragmentos rotos de pómez, escoria de composición dacítica, hasta fragmentos de roca como dacitas, andesitas y porfídicas de diferente tamaño que forman niveles de ceniza y lapilli. Estos depósitos presentan espesor variable entre 10 y 20 metros. El estado de consolidación de estos depósitos lo describe (Aguirre & Gutierrez, 1992) el primero está compuesto por paquetes de arena volcánica cuyo espesor puede alcanzar de 10 a 50 cm, sobre este depósito descansan paquetes de materiales como ceniza con lapilli, ceniza arenosa y lapilli; el espesor promedio de esta primera unidad en la ciudad varía entre 10 y 15 m, estas cenizas muestran tonalidades de gris, amarillo, café e incluso color rojizo donde se evidencian niveles de oxidación producto del nivel freático, adicionalmente la composición principal de estos estratos son los anfíboles, feldespatos, cuarzo, pómez y líticos; por su condición de inconsolidados son potencialmente inestables, el segundo estado es decir el consolidado denominado toba se localiza infrayaciendo el estado inconsolidado, sus espesores pueden alcanzar los 10 m y se profundizan hasta alcanzar el contacto con las unidades geológicas presentes en la ciudad como lo son las rocas de la formación Quebradagrande, los flujos volcánicos Casabianca y Manizales o las unidades ígneas. La textura de esta unidad es limoarenosa y los colores varían entre café oscuro y claro, gris verdoso y oscuro, y amarillo grisáceo, además, dentro de estos depósitos piroclásticos se pueden detectar niveles de paleosuelos que insinúan la inactividad volcánica entre eventos y su espesor varía entre 1 y 2 m.

En cuanto a las propiedades físicas y comportamiento mecánico de los depósitos de caída piroclástica los ciclos de secado y humedecimiento típicos en las zonas de Trópico, con periodo bimodal de lluvias y precipitaciones anuales entre 1500 y 2250 mm, pueden afectar el buen comportamiento de estos depósitos, lo que podría generar erosión y deslizamientos frecuentemente

de tipo planar, y de forma irregular definida por el contacto entre la capa de suelos derivados de cenizas volcánicas y la capa que la subyace, compuesta por materiales de origen Vulcano-detritico ligeramente meteorizados (Lizcano et al., 2006).

La presencia de contactos litológicos como la formación Quebradagrande o depósitos fluvio-torrenciales como la formación Casabianca, entre depósitos de caída piroclástica fue descrita por (Aristizabal, 2017) como característico en la ciudad de Manizales y donde este rasgo fue evidenciado en deslizamientos de gran magnitud

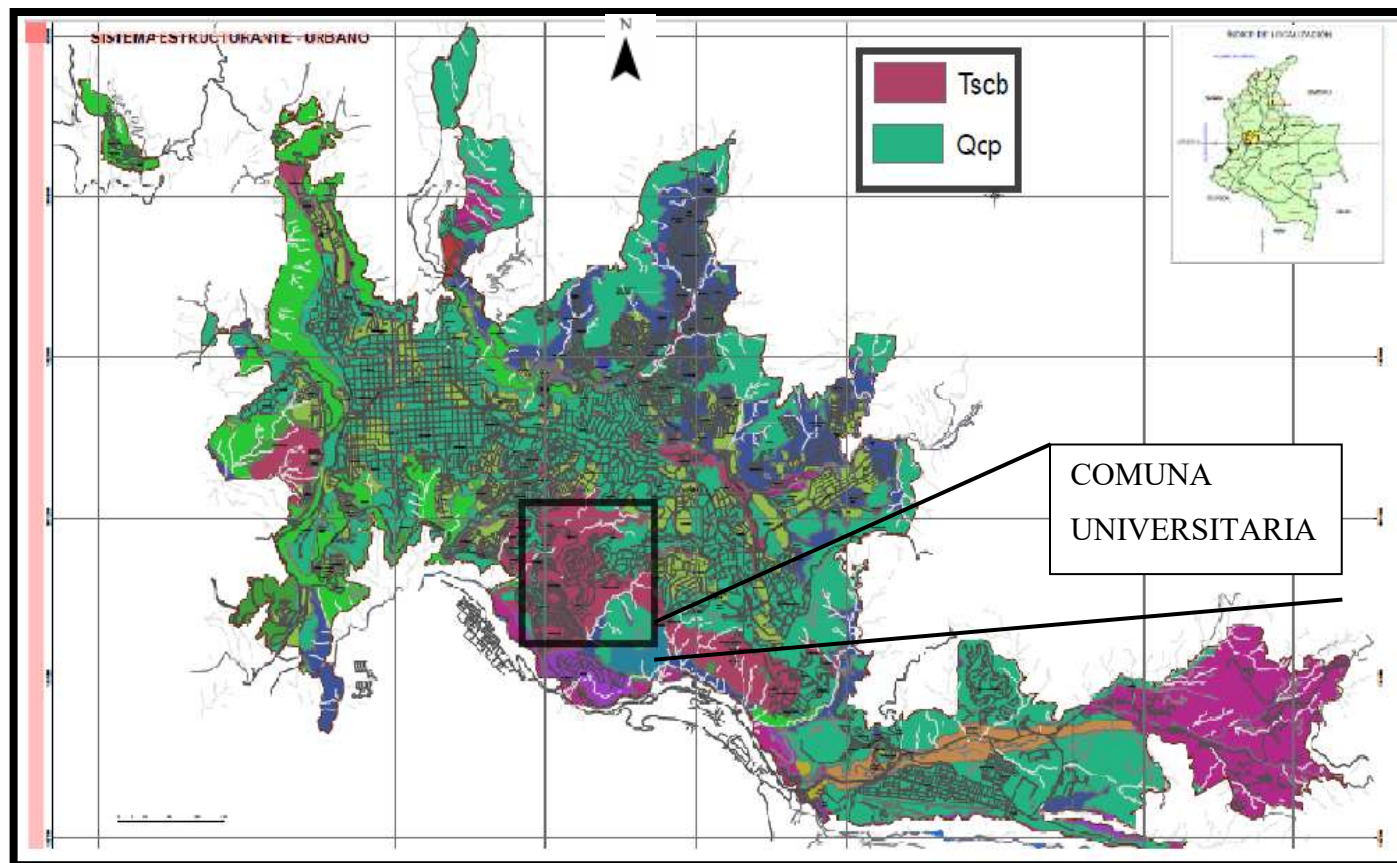
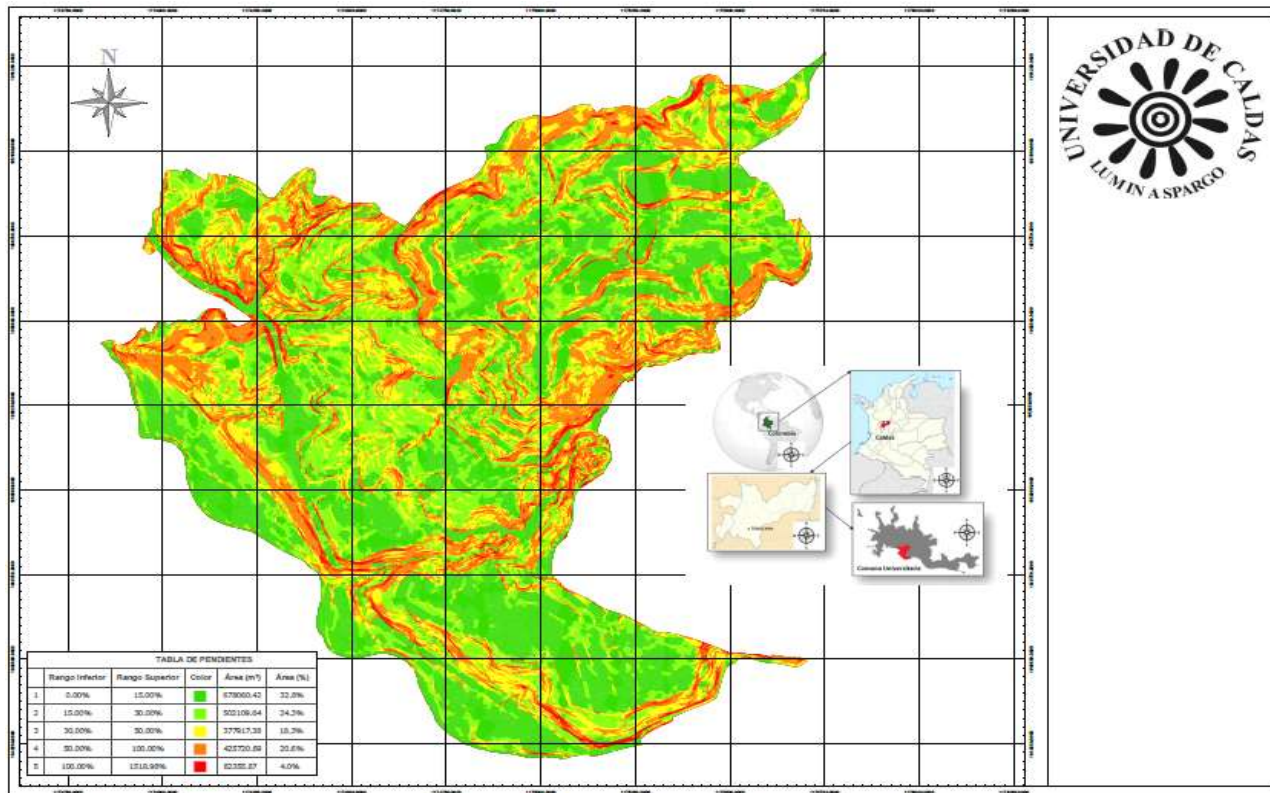


Figura 13. Modificado de plano D-2D-Mapa formaciones superficiales en el recuadro se enmarca la comuna Universitaria y las formaciones Tscb Formación Casabianca y Qcp Depósitos de caída piroclástica. (Alcaldía de Manizales, 2017)

3.3. Geomorfología

La zona cuenta con características geomorfológicas bien definidas, correspondiente a zonas de montaña que presentan pendientes que van de cortas a largas. Entre los ambientes geomorfológicos existen condiciones morfogénicas denudaciones, como son las laderas prolongadas con control estructural, laderas fuertemente afectadas por procesos de remoción en masa, rellenos torrenciales y de avalanchas antiguas (Alzate, 2019).

Con el fin de conocer las características típicas de la comuna Universitaria se usan modelos de elevación digital y son presentados en la (Figura 14).



Rango Inferior	Rango Superior	Color	Área (m ²)	Área (%)
1	0.00%	15.00%	678060.42	32.8%
2	15.00%	30.00%	502109.64	24.3%
3	30.00%	50.00%	377917.38	18.3%
4	50.00%	100.00%	425720.69	20.6%
5	100.00%	1518.98%	82355.87	4.0%

Figura 14. Mapa de pendientes características
Modificado de (Alcaldía de Manizales, 2017)

3.4. Condiciones de lluvia

De acuerdo con lo descrito por (Jaramillo et al, 2000), en la región andina la lluvia está influenciada por la presencia de vientos alisios que se dirigen desde el Atlántico, masas de aire que penetran desde el Pacífico y la humedad del Amazonas, Lo anterior conlleva a que en la región se presente una distribución intra-anual en la región andina de Colombia (Caldas , Risaralda, Quindío, Tolima y Cundinamarca), en la que se presenta un régimen de lluvia bimodal en la que se caracterizan dos periodos, semi-secos o con bajas lluvias, el primer periodo entre los meses de enero- febrero y el segundo en junio-julio, en cuanto al régimen lluvioso de la región se presenta en los periodos de Marzo-junio el primer periodo y septiembre-Diciembre el segundo, en el régimen lluvioso se tiene presencia de altos niveles de nubosidad que se relacionan con la zona de confluencia intertropical y la presencia de montañas.

Las condiciones de distribución de la lluvia en Manizales son recopiladas y analizadas por el IDEA de la Universidad Nacional de Colombia, en conjunto con la Alcaldía de Manizales por medio de la oficina municipal para prevención y atención de desastres OMPAD, por lo que la recopilación y análisis de información de estaciones hidrometeorológicas en Manizales es descrita por (Pachón G., 2011), como operador de la red IDEA, en un estudio realizado en el que describe que en Manizales el 71% de los días llueve, el promedio de lluvias fuertes es del 8%, para el 92% restante se tienen lluvias moderadas, ligeras y lloviznas, finalmente el estudio de lluvias multianuales en Manizales para el estudio deja un promedio de 2178 mm de lluvia multianual.

4. Fundamento teórico

Un aspecto importante en la ingeniería es la labor que se tiene para adaptar el terreno a fines ingenieriles, como lo son la estabilidad de estructuras y la construcción de cimentaciones, la solución de estos problemas tiene fundamento en la mecánica de suelos, nacida en 1925 con el llamado padre de la geotecnia Karl Terzaghi (Badillo & Rodríguez, 1963) (Jiménez Salas & de Justo Alpañes, 1975), la geotecnia permite generar condiciones de estabilidad y factores de seguridad que permiten viabilizar la ejecución proyectos (Coupé, 2011). Uno de los conceptos mayormente analizados en los estudios geotécnicos son los movimientos en masa o deslizamientos generados como respuesta a la inestabilidad de los taludes los cuales a su vez son responsables de un volumen de daño mayor que los sismos e inundaciones y su ocurrencia produce cambios morfológicos, daños en la infraestructura, bloqueo de cuerpos de agua, entre otros (Suárez, 2009).

4.1. Talud

Un talud es una superficie inclinada con respecto a la horizontal que puede ser de origen natural o artificial y adopta la estructura de la tierra permanentemente (Figura 15) (*Geología y Geotecnia Tema : Estabilidad de Taludes*, 2003). Los taludes se dividen en terraplenes, cortes en talud natural y muros de contención.

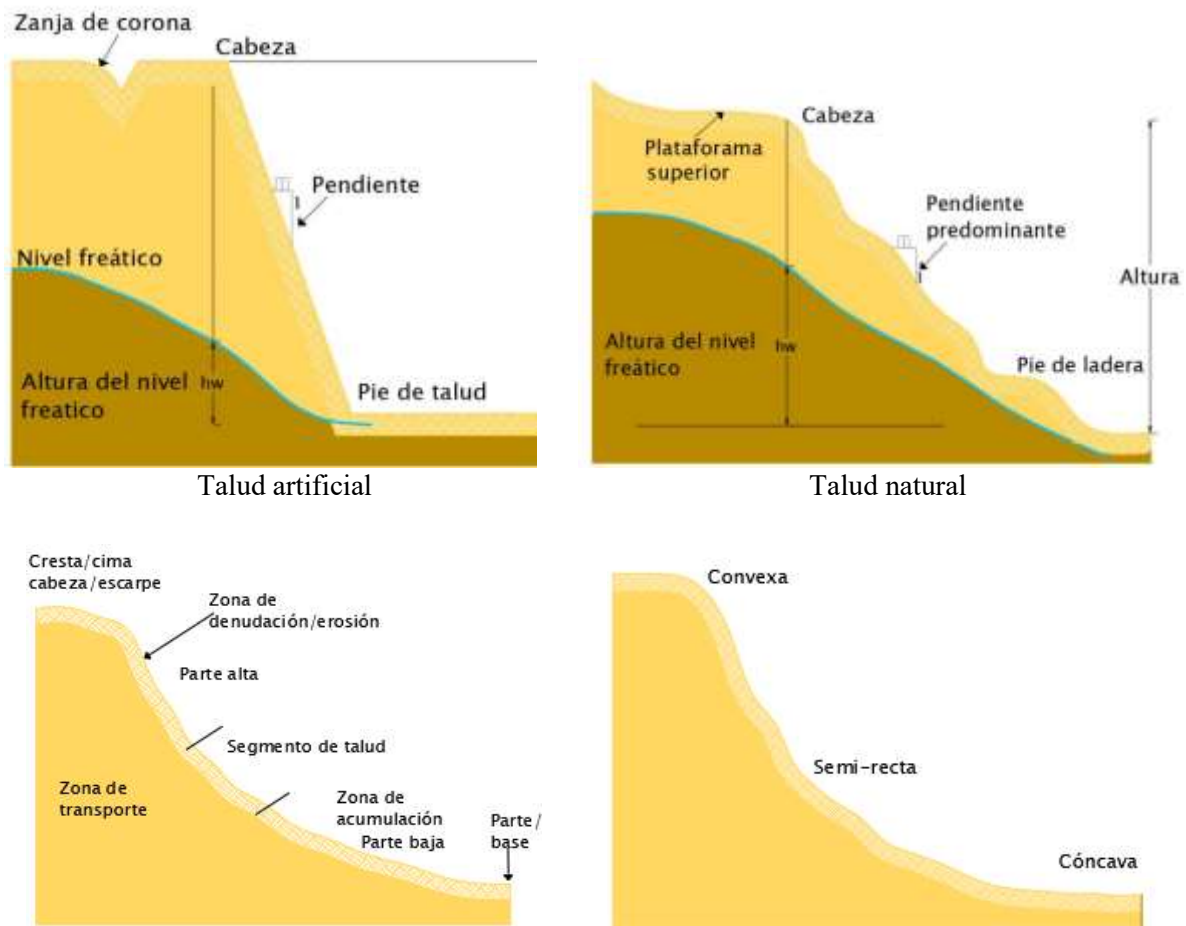


Figura 15. Características de los taludes (modificado de Suarez, 2004).

Las diferentes partes de un talud son:

- Pie/Pata o base: zona donde la pendiente cambia de forma abrupta y cóncava.
- Cabeza/Cresta/Cima/escarpe: zona superior donde la pendiente cambia abruptamente. Cuando se tienen pendientes altas pendientes se denomina escarpe; estos pueden coincidir con la corona del deslizamiento y su forma es convexa generalmente.
- Nivel freático: distancia vertical del pie del talud o ladera hasta el nivel de agua.
- Pendiente: es la inclinación del talud o ladera media en porcentaje o en relación m:1. El concepto de pendiente se define como la relación existente entre la variación de una

distancia medida en la horizontal y su correspondiente en la vertical en una unidad de terreno determinada.

$$\text{Ecuación 1. } \frac{\text{Altura (Rise)}}{\text{Dist.horizonta}} = \text{Tan } \theta$$

4.2.Deslizamientos

Un movimiento en masa o deslizamiento se define como el desplazamiento de material litológico o de escombros en dirección vertical o pie de ladera por acción de la gravedad (Figura 16).

Como parte de la solución al momento de contener el fenómeno que se estudia, es importante analizar el comportamiento en los taludes y clasificar el tipo de movimiento y falla presentada (Ricardo et al., 2015).

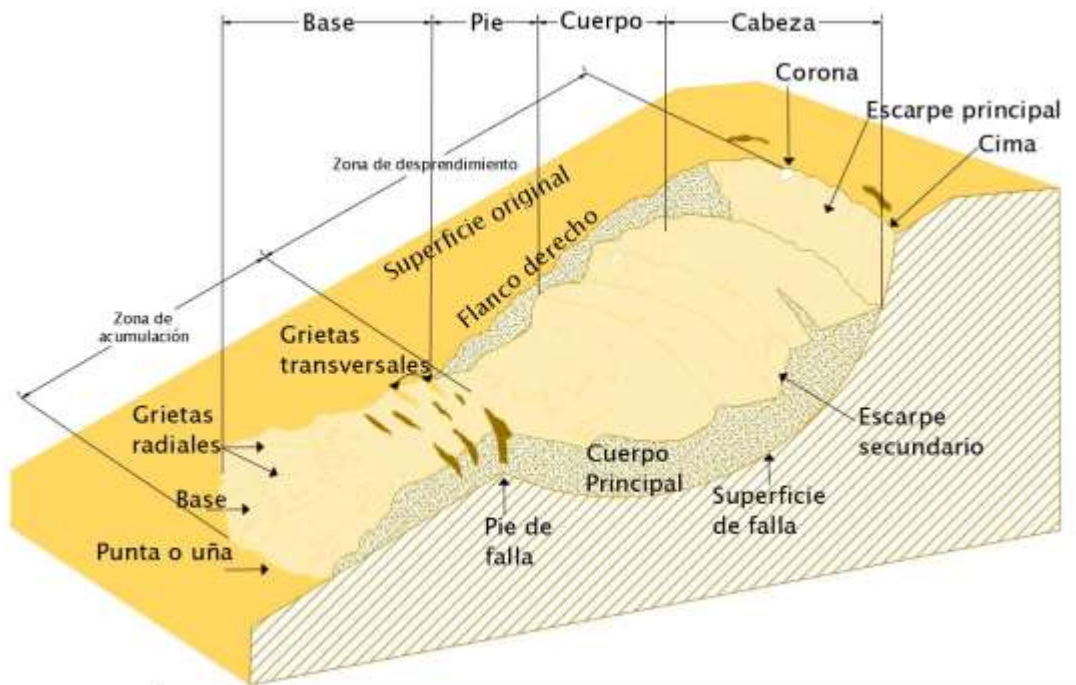


Figura 16. Partes que conforman los movimientos en masa o deslizamientos (modificado de Suarez, 2004)

En algunos casos, los movimientos en masa se clasifican de acuerdo con la envergadura del movimiento (Zolotariev, 1956) o en otros de acuerdo con el tipo de movimiento (Varnes, 1978). En la Tabla 2 se presenta la clasificación de los movimientos en masa con base en los trabajos de este último autor.

4.3. Tipos de deslizamientos

Los tipos de deslizamiento descritos por Varnes (1978) y recopilados y actualizados por Suarez (2004) se describen a continuación:

Tabla 2. Clasificación de movimientos en masa (modificado de Varnes, 1978).

Tipo de movimiento	Suelos ingenieriles			
	Rocas	Gruesos	Finos	
Caídas	Caída de rocas	Caída de detritos	Caídas de tierra	
Volcamiento	Volcamiento de rocas	Volcamiento de detritos	Volcamiento de tierra	
Rotacional	Una unidad litológica	Hundimiento de roca	Hundimiento de detritos de tierra	
Deslizamiento	Traslacional	Varias unidades litológicas	Deslizamiento de bloques de roca	Deslizamiento de bloques de detritos de tierra
Propagación lateral	Propagación de roca	Propagación de detritos	Propagación de tierra	
Flujos	Flujo de rocas (Arrastre profundo)	Flujo de detritos /escombros	Flujo de tierra	
Complejos	Reptación (Creep)			
	Combinación de dos o más tipos de movimientos principales			

4.3.1. Volcamiento

El volcamiento se produce sobre una ladera o talud, debido a colapsos del material rocoso, se caracterizan por su heterogeneidad litológica y estructural, este movimiento es causado por acción de la gravedad y rotación en sentido hacia adelante y con punto de giro localizado en la zona inferior (Vargas, 2000). La estructura geológica del material que se desprende marca la secuencia del movimiento debido a su dirección, buzamiento, las familias y tipos de discontinuidades que posea (Suarez, 1989). El movimiento puede estar impulsado por fuerzas como el agua presente en las grietas y el sismo y su velocidad varía con la inclinación del bloque (Figura 17).

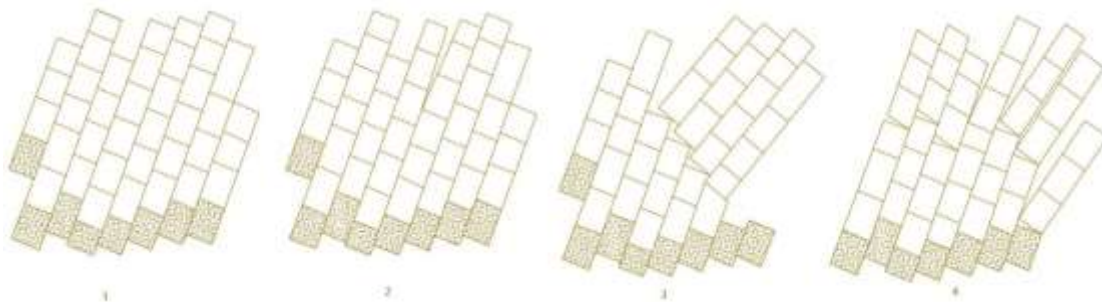


Figura 17. Proceso de falla al volcamiento (modificado de Suarez, 2004)

4.3.2. Reptación (*Creep*)

La reptación consiste en movimientos subsuperficiales que pueden darse a profundidades de pocos centímetros hasta varios metros (Figura 18) (Narvéez et al., 2009). Cabe señalar que este movimiento no posee superficie de falla definida y su velocidad es muy lenta (Gerscovich, D. M., 2016).

La forma de evidenciar su ocurrencia se da a través de monitoreo y uso de inclinómetros y la característica principal para identificación del fenómeno consiste en observar estructuras desplazadas, vegetación inclinada, y fisuras en las estructuras (Corominas et al., 2013).

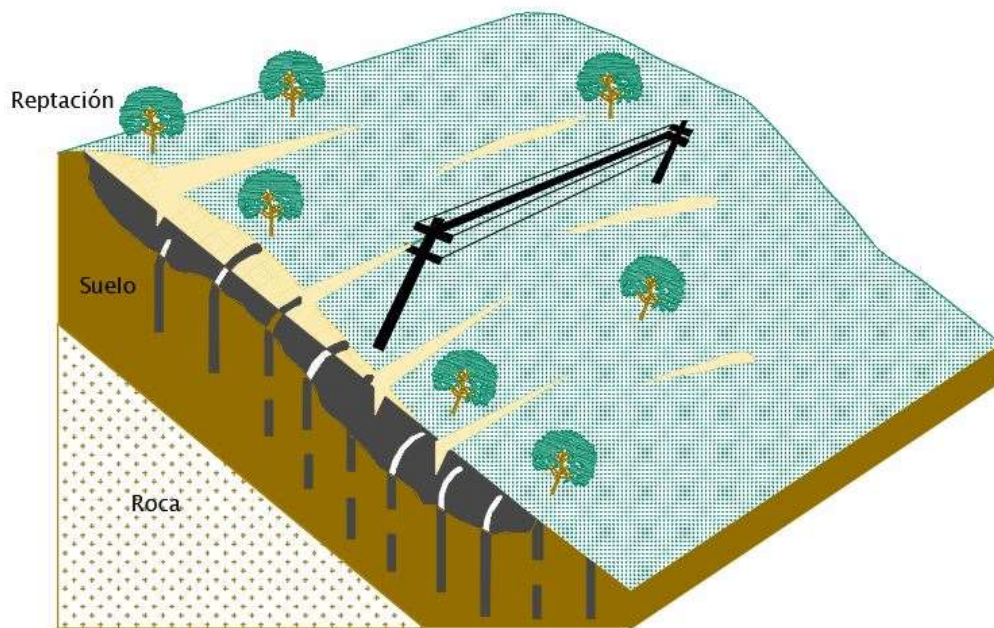


Figura 18. Diagrama que ilustra un proceso de reptación (modificado de Suarez, 2004)

4.3.3. Rotacional y planar

Los deslizamientos de tipo rotacional y planar o traslacional se caracterizan por ser movimientos de corte a lo largo de una superficie, que pueden involucrar varias unidades o masas semindependientes. En la superficie de falla suelen ocasionarse movimientos progresivos y graduales, es decir, que no se generan en el mismo tiempo. Estos movimientos se pueden presentar de manera compuesta (cuando ocurren al menos dos clases de deslizamientos en diferentes zonas de la masa deslizada).

- **Deslizamiento rotacional**

La superficie de falla en el deslizamiento rotacional es cóncava hacia arriba, el movimiento se presenta en el eje paralelo de la superficie y transversal al deslizamiento, y las grietas en dirección al movimiento tienen formas concéntricas y cóncavas semejantes a la forma de una cuchara. Específicamente, este tipo de deslizamientos se origina principalmente en suelos homogéneos,

donde los casos más conocidos se presentan en suelos arcillosos blandos con perfil profundo, en suelos residuales meteorizados con gran espesor y en terraplenes artificiales. Adicionalmente, la localización de la superficie de falla está dada por la influencia de las discontinuidades y los planos de estratificación. En los deslizamientos rotacionales, los bloques ubicados en la parte superior se inclinan hacia atrás, el escarpe principal regularmente es vertical, la masa desplazada se acumula ladera abajo y su deformación interna es de muy bajo grado, (Alcántara Ayala, 2000). Los movimientos posteriores al iniciar, pueden ocasionar el retroceso progresivo de la corona. La relación D_r/L_r en el deslizamiento rotacional está entre 0.15 y 0.33 (Figura 19), (Skempton & Hutchinson, 1969).

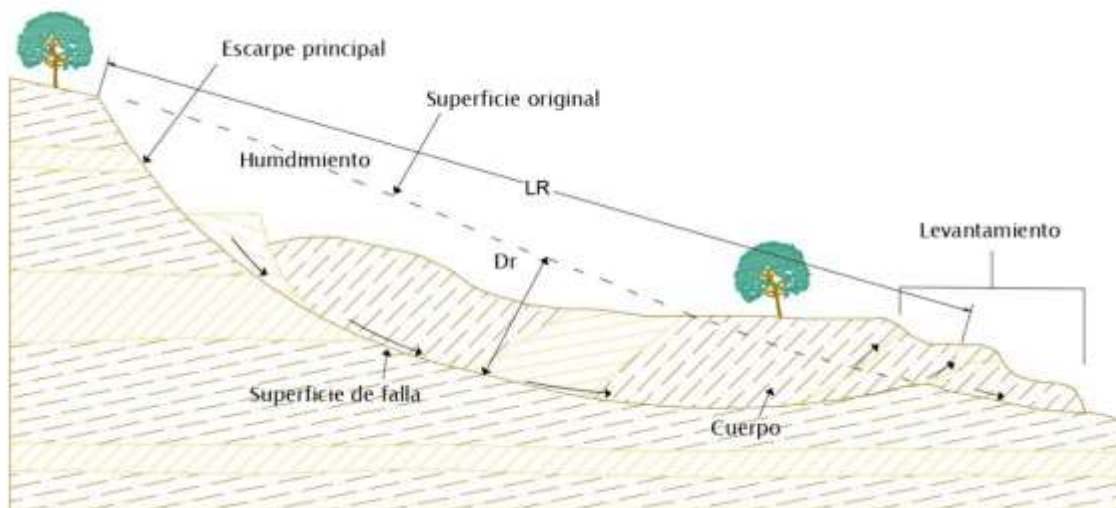


Figura 19. Deslizamiento de rotación en una ladera (modificado de Suarez, 2004)

- **Deslizamiento planar o traslacional**

En este tipo de deslizamientos la masa se desliza hacia afuera o hacia abajo en una superficie con tendencia plana u ondulada. Estos movimientos pueden convertirse en flujos, especialmente en zonas con fuerte pendiente.

Este tipo de movimiento se puede presentar en zonas donde la meteorización cambia en profundidad, es decir en las zonas de cambio a la resistencia al cortante por efecto de la meteorización. Cuando ocurre lo anterior, se generan zonas de contacto que terminan en movimientos de traslación (Figura 20). En los deslizamientos planares la masa puede desplazarse indefinidamente a lo largo del talud. (Suarez, 1989).

Usualmente este tipo de movimientos determinan deslizamientos superficiales en suelos granulares, o bien están definidos por superficies de debilidad en formaciones rocosas, tales como planos de estratificación, juntas y zonas de diferente alteración o meteorización de las rocas con ángulos de inclinación que propician deslizamientos (Mendoza & Domínguez, 2006).

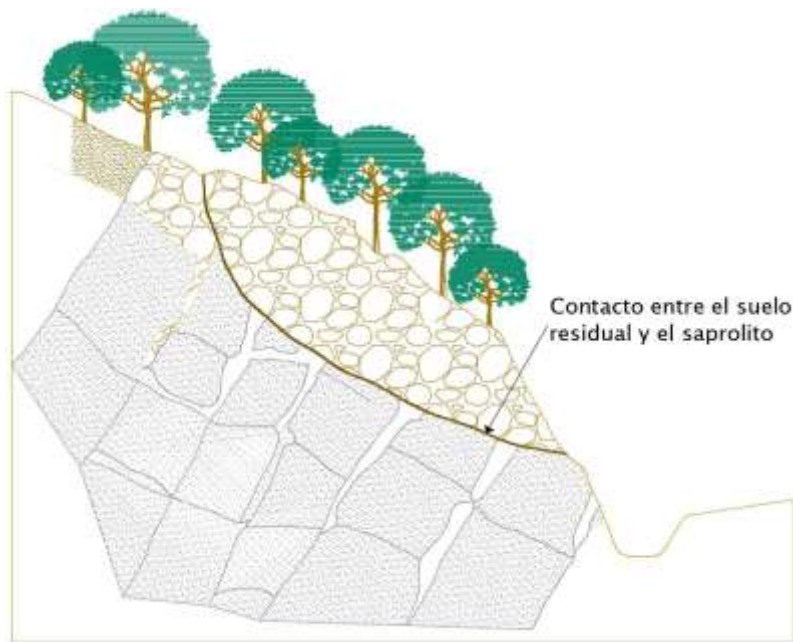
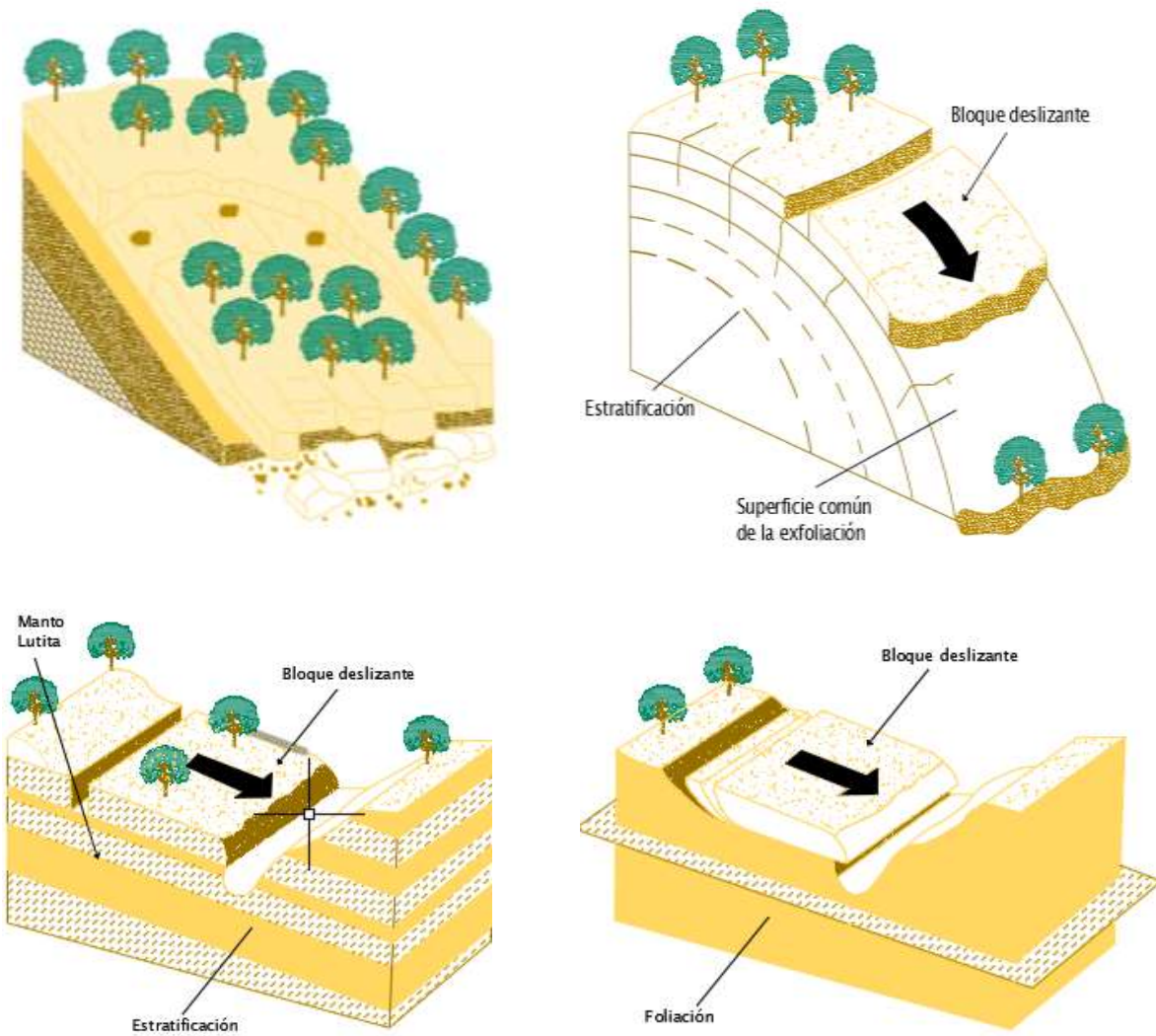


Figura 20. Deslizamiento de traslación en una ladera (modificado de Suarez, 2004)

Los deslizamientos planares obedecen principalmente a superficies débiles tales como fallas, juntas, fracturas, planos de estratificación, foliación y zonas de contacto entre suelo blando y la roca. A continuación, se presentan las imágenes donde se evidencian diferentes fenómenos de traslación (Figura 21). Los efectos se acentúan o se presentan cuando ocurren sismos, presiones

altas de agua o cuando el material expuesto se debilita por acción de la alteración (González García, 1983).

De acuerdo con el manual de derrumbes escrito por (Highland & Bobrowsky, 2008) los fenómenos de traslación son unos de los tipos de deslizamientos más comunes a nivel mundial y se puede generar en todo tipo de ambientes y condiciones.



Ejemplos de deslizamiento de traslación en un figuraa ladera (modificado de Suarez, 2004)

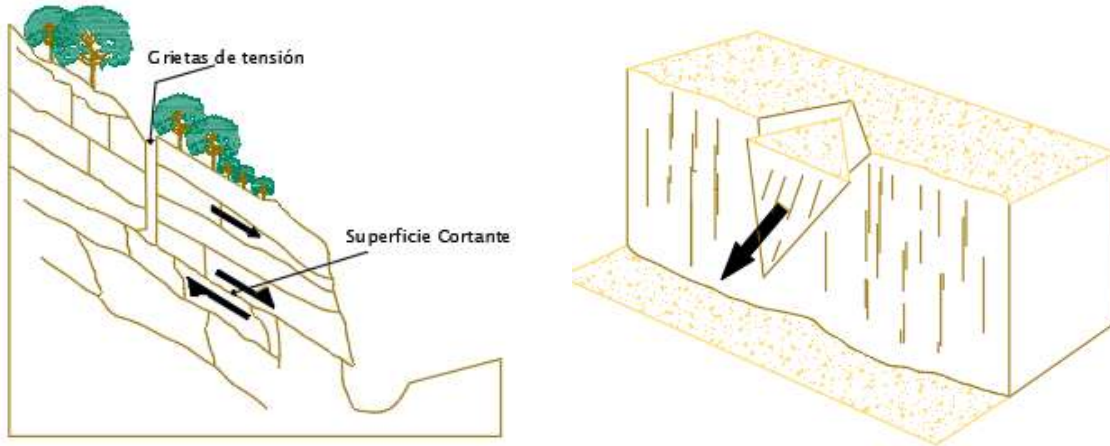


Figura 21. Ejemplos de deslizamiento de traslación en una ladera (modificado de Suarez, 2004)

4.3.4. Propagación o extensión lateral

Son movimientos principalmente laterales presentes en taludes de baja pendiente (Figura 22). En este fenómeno predomina la extensión lateral acomodada por fracturas de corte o tensión, y se presenta generalmente en las masas de roca sobre suelos plásticos o finos como arcillas o limos que pierden resistencia al remodelarse. La extensión lateral se presenta comúnmente en los sedimentos glaciares y marinos, pero es poco usual en suelos tropicales. Este tipo de fallas puede desencadenar deslizamientos rotacionales, planares o flujos.

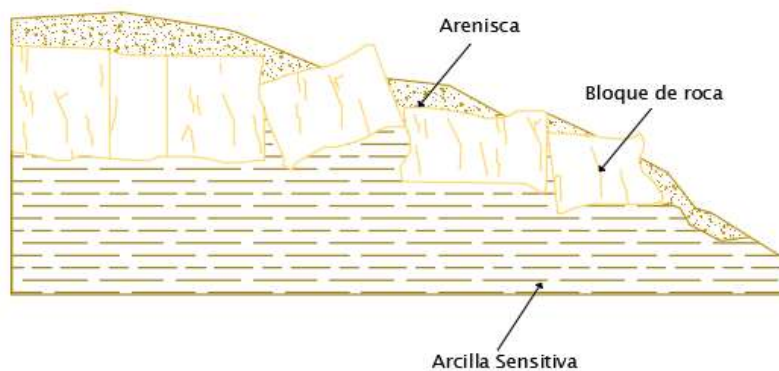


Figura 22. Representación fenómeno extensión lateral (modificado de Suarez, 2004)

4.3.5. Hundimientos

Este fenómeno se desarrolla en dirección vertical (Figura 23) y se origina en masas de suelo que sufren cambios de volumen. Su dimensión varía entre pequeños movimientos a grandes magnitudes. Este fenómeno no ocurre necesariamente en un talud, ya que puede darse simplemente en un área determinada de suelo es causado por deformación geológica, en donde a profundidades de gran escala, los macizos rocosos sufren cambios de esfuerzos. También se presenta hundimiento debido a deformación por subsidencia, donde por formaciones de cavernas en las rocas producto de la meteorización química, se genera colapso en las paredes de estas.

A su vez se presentan hundimientos confinados por cambios de presiones de poros que obedecen a reacomodos de las partículas en cambios de volumen, debido a presiones de poros negativas.

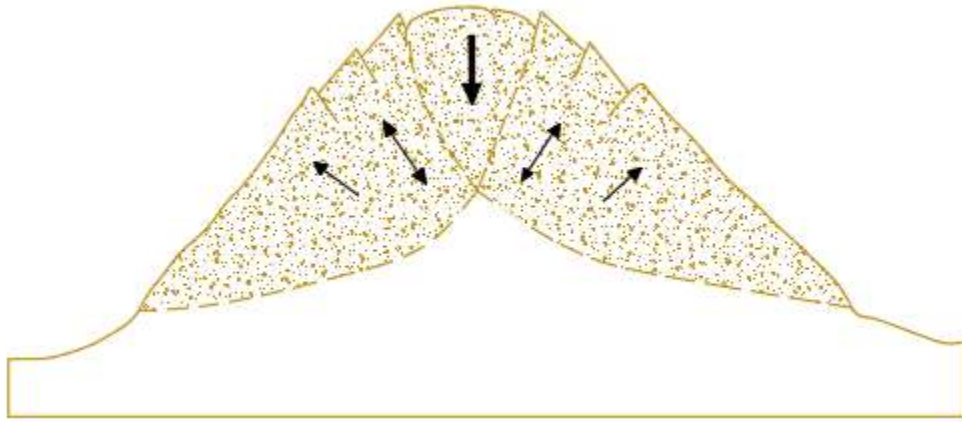


Figura 23. Representación fenómeno hundimiento (modificado de Suarez, 2004)

4.3.6. Flujos

Al interior de los movimientos tipo flujos, se mueven partículas dentro de la masa deslizante; deformaciones que se mueven en forma de líquido viscoso. Este fenómeno se comporta de forma laminar o turbulenta dependiendo de la acomodación de partículas dentro del movimiento y posee factores detonantes como lluvias, deshielos, sismos, alteración de suelos sensitivos y zonas de alta pendiente. En cuanto a la velocidad de los flujos, puede comportarse de forma rápida o lenta; cuando las velocidades son altas se generan avalanchas y lahares y en los casos de flujos lentos, su comportamiento es similar a la reptación. El tamaño del material que puede deslizarse en los flujos va desde rocas, detritos, suelo y lodo.

La densidad de los flujos permite determinar el comportamiento del movimiento, a menor porcentaje de sedimentos se tiene un comportamiento más viscoso tipo flujo de lodos y a mayor porcentaje de sedimentos se presenta un flujo de detritos. La representación de estos fenómenos se evidencia en (Figura 24).

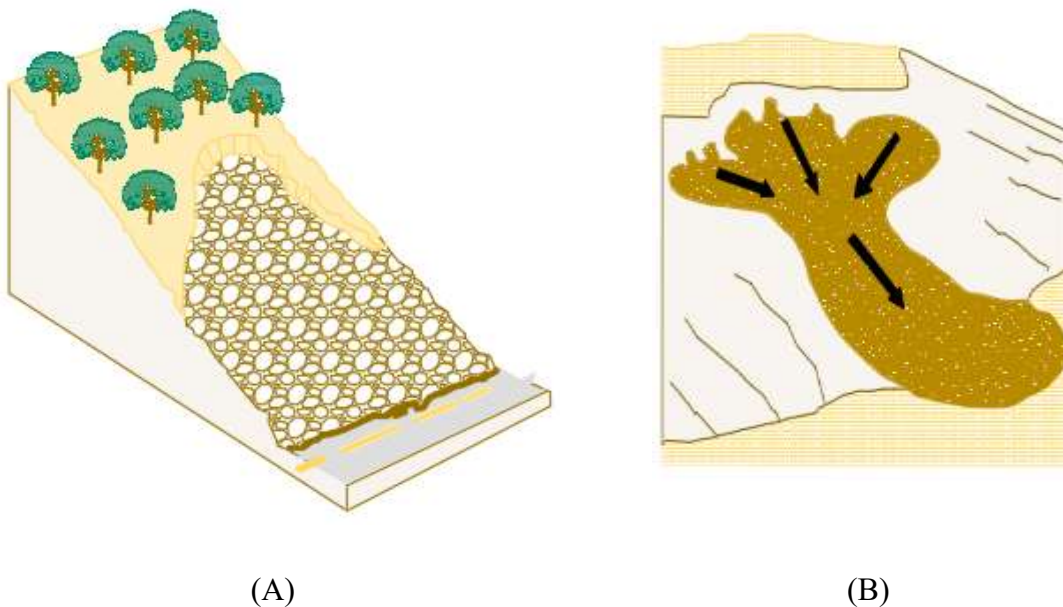


Figura 24. Representación fenómeno de flujos. (A) Flujo de rocas, (B) Fenómeno de flujo de lodos (modificado de Suarez, 2004).

4.4. Parámetros físicos y mecánicos de los suelos usados en los análisis de estabilidad

Las propiedades geotécnicas del suelo están dadas en función del grado de meteorización y de su génesis; su clasificación consiste en descripciones sobre compuestos minerales y su estructura y a partir del análisis se comprende el comportamiento mecánico del suelo (Aparicio-Ortubé et al., 2019). En Colombia, la determinación de parámetros geotécnicos se rige por lo estipulado en el título H de la Norma Sismo Resistente Colombiana (NSR-10)- Estudios geotécnicos. Este documento integra la Norma Técnica Colombiana (NTC), que a su vez es adaptada de la American Society for Testing and Materials – (ASTM) y la certificación ICONTEC. Adicionalmente, para efectos de clasificación del suelo la (NSR-10) define el concepto de dos tipos de suelos; granulares-no cohesivos y cohesivos.

4.4.1. Parámetros físicos

- **Relación de vacíos**

Se denomina relación de vacíos a la relación entre el volumen de vacíos en el suelo y el volumen de sólidos que conforman el suelo (Crespo, 2005).

$$\text{Ecuación 2. } e = \frac{V_v}{V_s}$$

Los valores de este parámetro varían de acuerdo con su naturaleza granular o cohesiva (Reid & Berry, 1993) .

- **Porosidad**

Se denota con la letra n y se define como la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total de la masa de suelo, generalmente se expresa en porcentaje (Crespo, 2005).

$$\text{Ecuación 3. } n (\%) = \frac{V_v}{V_t} * 100$$

La porosidad también puede expresarse en función de la relación de vacíos como:

$$\text{Ecuación 4. } n = \left(\frac{1}{1+e} \right) e$$

- **Grado de saturación**

Es la relación existente entre el volumen de agua y el volumen de vacíos del suelo, generalmente se expresa en porcentaje.

$$\text{Ecuación 5. } G = \frac{V_w}{V_v} \cdot 100$$

- **Humedad**

Se define como humedad a la relación entre el peso del agua y el peso de los sólidos de un suelo, generalmente se expresa en porcentaje (Crespo, 2005). Los autores (Reid & Berry, 1993) la definen como la proporción de agua presente en el suelo.

$$\text{Ecuación 6. } w (\%) = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100$$

- **Peso unitario**

El peso unitario se obtiene por medio de la multiplicación de la densidad por la aceleración de la gravedad y se define como el peso por unidad de volumen (Reid & Berry, 1993). El peso unitario de un material puede ser húmedo PUH cuando se tiene la muestra de suelo en su estado natural y Peso unitario seco PUS cuando el contenido de humedad se ha reducido (Aristizabal, 2017).

- **Plasticidad**

La plasticidad es la propiedad que presenta el suelo para deformarse hasta cierto límite sin romperse (Crespo, 2005). Otros autores como (Badillo & Rodríguez, 1963) definen la plasticidad como la capacidad de un material para soportar deformaciones de forma rápida, sin sufrir rebote elástico, cambios de volumen aparente, desmoronamiento o agrietamiento. Para conocer la plasticidad del suelo es necesario hacer uso de los límites de Atterberg. El uso de estos límites permite conocer los cuatro estados de consistencia de un suelo; sólido, semi-sólido, plástico y líquido (Puy Santín, 2005). Los límites definidos por Atterberg para establecer los estados descritos se definen de la siguiente manera:

Límite líquido LL se define como el contenido de humedad del suelo en la frontera entre el estado líquido y plástico. El contenido de humedad en porcentaje en el estado semisólido y plástico, se denomina límite plástico LP; la diferencia en éste se conoce como Índice de plasticidad (Aristizabal & Mendoza, 2017). El límite de contracción LC de un suelo se define como el contenido mínimo de agua, en la que no se genera cambio de volumen (Osorio, 2011).

4.4.2. Parámetros mecánicos

Los parámetros de resistencia al corte de un suelo son factores influyentes en la estabilidad de un talud y se definen en términos de esfuerzo efectivo (Das, n.d.)

$$\text{Ecuación 7. } S = c' + \sigma' \operatorname{tg} \theta'$$

En donde

σ' = Esfuerzo efectivo normal al plano de corte

c' = Resistencia no drenada o cohesión aparente

θ' = Ángulo de fricción por esfuerzo efectivo

Coulomb (1976), determina que la resistencia al cortante de los suelos depende del tipo de material y estos se comportan de acuerdo con las teorías tradicionales de fricción y cohesión, que a su vez son definidas como propiedades intrínsecas del material (Suarez, n.d.).

De acuerdo con (Reid & Berry, 1993) la resistencia al corte de los suelos depende de los esfuerzos efectivos. Para determinar estos parámetros de resistencia se pueden emplear ensayos de corte directo convencionales, ensayos triaxiales de compresión. Es fundamental aclarar que cuando los esfuerzos desviadores de falla alcanzan la envolvente, la trayectoria más corta la sufren los esfuerzos generados por los ensayos no consolidados no drenados, de la misma manera el comportamiento del suelo al esfuerzo cortante está regido por los esfuerzos efectivos (Figura 25) (Suárez Díaz, 1998).

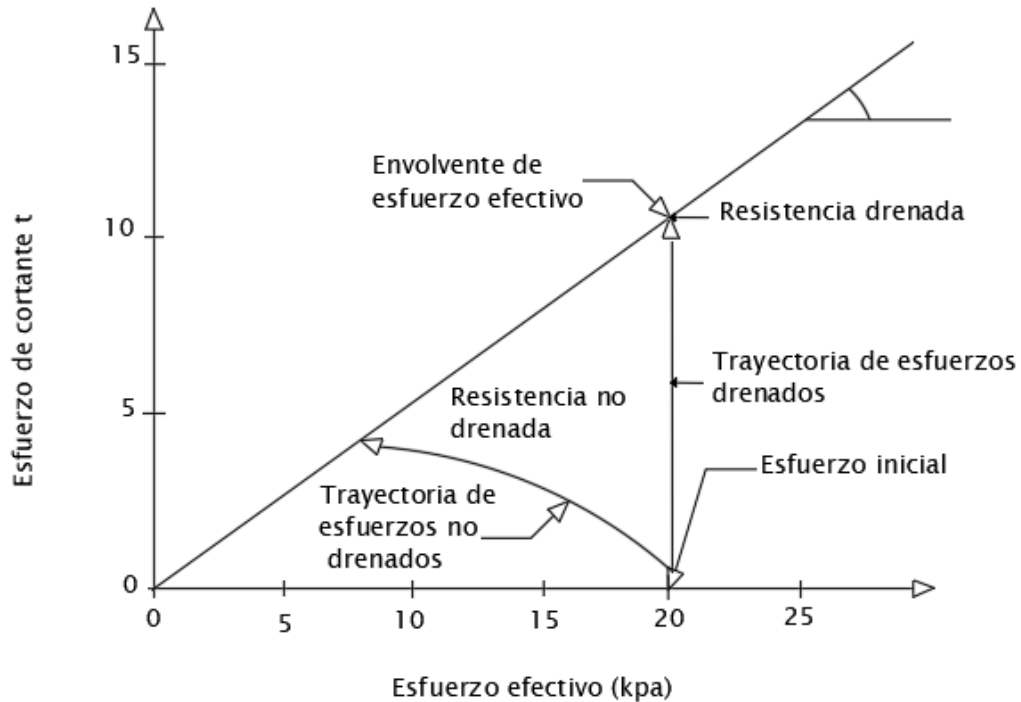


Figura 25. Gráfica de Trayectoria de esfuerzos en un ensayo de corte directo para condiciones drenadas y no-drenadas (Duncan & Wrigth, 2005).

Por lo tanto, se relaciona que para la resistencia no drenadas en los análisis de estabilidad, sobre todo los pseudo – estáticos representa la condición de sismos debido a que estos ocurren en periodos cortos y el suelo no drena apreciablemente durante el sismo, por lo tanto, el uso de ensayos bajo estas condiciones es adecuado (Sepúlveda, 2011).

- **Angulo de fricción:** (Suarez, n.d.) define el ángulo de fricción como la representación matemática del ángulo de rozamiento. El ángulo de fricción depende de factores como tipo de material, forma de los granos, distribución de tamaños de granos, organización de las partículas, densidad, permeabilidad, presión de confinamiento y presión de consolidación.
- **Cohesión:** (Suarez, n.d.) define la cohesión como una medida de la cementación. Este término es utilizado para representar las fuerzas de tensión. La cohesión es propia de suelos no granulares.

4.4.3. Ensayos directos para obtención de parámetros mecánicos

- **Ensayo de corte directo:** El ensayo de corte es una prueba directa que permite conocer parámetros de resistencia como ángulo de fricción y cohesión por medio de la aplicación de una carga normal y luego una carga de cortante a una muestra de suelo (Das, .d.). La normatividad colombiana para este ensayo corresponde a la definida por Invias en su norma I.N.V.E-154 -07, en esta también se toma como referencia las normas ASTM D3080-98 y AASHTO T236-03. El tamaño de la muestra para el corte directo corresponde a una caja dividida en dos mitades compuesta por dos anillos los cuales pueden desplazarse uno con respecto al otro horizontalmente al aplicarse una fuerza cortante. En cada ensayo realizado se obtiene una gráfica esfuerzo-deformación, en este se determinan los valores de resistencia máxima y residual. Es necesario realizar varios ensayos aplicando diferentes presiones normales, con el fin de generar gráficamente la envolvente de falla y finalmente en la gráfica se identifican los valores de cohesión y ángulo de fricción (Suarez, n.d.). Por ultimo los esfuerzos normales y cortante son:

$$\text{Ecuación 8. } \sigma' = \frac{N}{A}$$

$$\text{Ecuación 9. } S = \frac{R}{A}$$

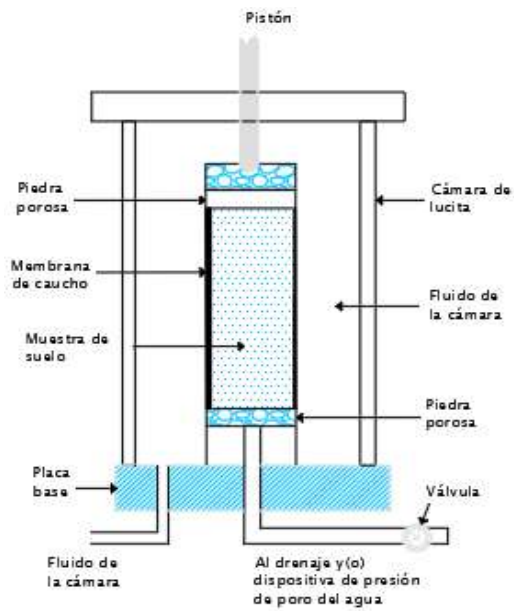
Donde

A= plano de falla en el suelo y corresponde al área de la sección transversal de la caja de corte donde se encuentra la muestra.

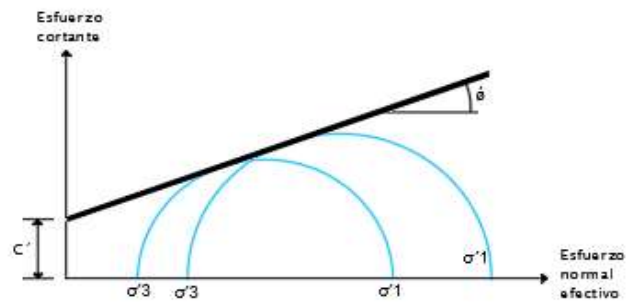
- **Ensayos triaxiales:** Los ensayos triaxiales corresponden a pruebas directas usadas en arenas y arcillas que permiten conocer parámetros de resistencia; tales como cohesión y fricción. Para el caso de las arcillas existen tres tipos particulares de prueba triaxial y su uso depende de si se requiere dejar que la muestra de suelo drene su contenido de agua durante la presión de confinamiento (Das, n.d.):

1. Prueba Consolidada drenada (CD)
2. Prueba Consolidación no drenada (CU)
3. Prueba no consolidada no drenada (UU)

La obtención de los parámetros del método se basa en la teoría de falla de Mohr coulomb (1776), donde a partir de una línea tangente común a los círculos de Mohr graficados se obtiene la envolvente de falla y a partir de esta los parámetros de cohesión y fricción de manera gráfica (Figura 26). La normatividad en Colombia para este tipo de ensayo está dada por el Invias en su norma I.N.V.E -153-07, en la que se usan bases de normas internacionales como AASHTO T234, AASTHO T 297, ASTM D 2850,ASTM D 4767.



a) Diagrama esquemático del equipo triaxial



b) Prueba consolidación drenada



c) Prueba consolidada no drenada

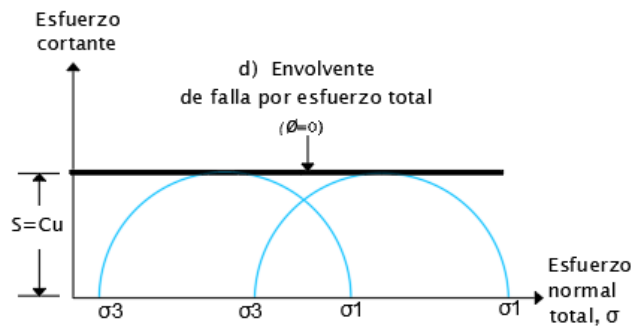
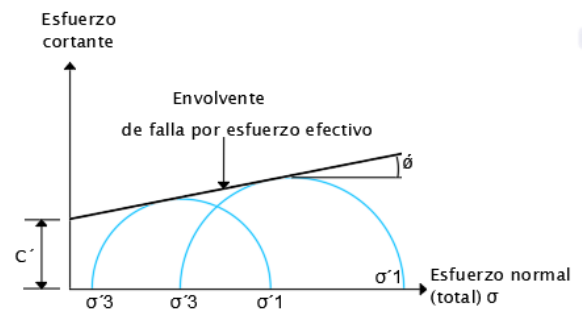


Figura 26. Gráficas típicas de ensayo triaxial (Tomado de (Das, n.d.))

- Compresión simple:** La prueba de compresión simple o prueba inconfiada es un subtipo de la prueba triaxial no consolidada no drenada y consiste en que la presión de confinamiento será igual a cero ($\sigma_3=0$), la presión que se aplica a la muestra es el esfuerzo principal mayor ($\sigma_1=q_u$), (Figura 27). Este ensayo sirve como indicador de la consistencia de las arcillas (Das, n.d.), la normatividad en Colombia para este ensayo está dada por Norma INV E-152-07.

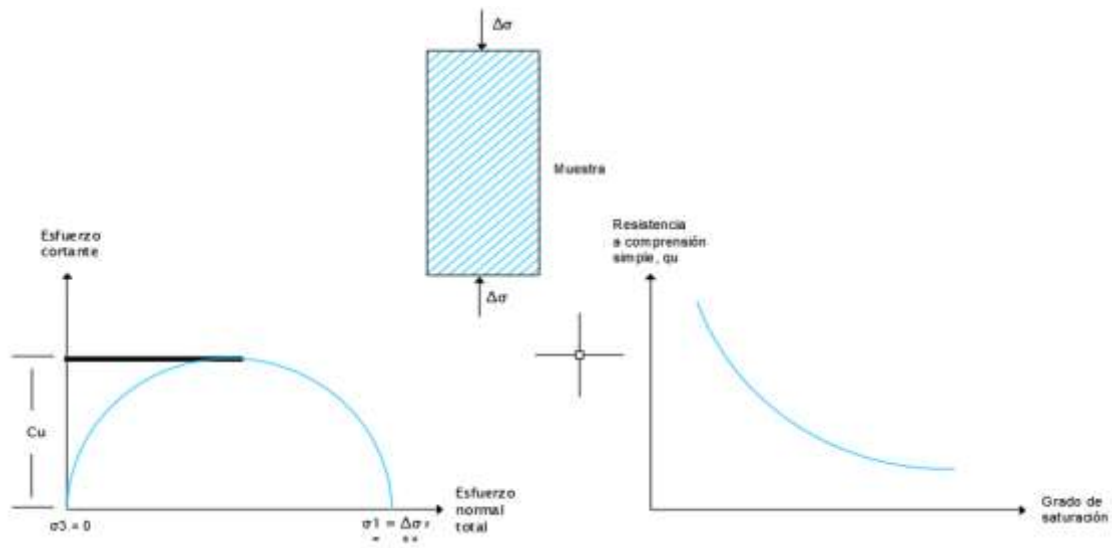


Figura 27. Graficas típicas de ensayo compresión simple (Tomado de Das & Gonzales, 2001).

4.4.4. Ensayos indirectos para obtención de parámetros mecánicos

- **Ensayo de penetración estándar SPT:** El ensayo del SPT (Estándar Penetration Test), permite obtener parámetros de resistencia del suelo por medio de un muestreador de tubo partido. Las ventajas del ensayo consisten en su economía y facilidad en el procedimiento; sin embargo, debe tenerse en cuenta que la muestra recuperada de este ensayo es una muestra alterada debido a la deformación por corte durante su realización. Este método es bastante usado ya que permite realizar correlaciones para obtención de parámetros mecánicos del suelo. Debido a que se presentan muchas variaciones entre las correlaciones existentes, es necesario realizar correcciones dependiendo de la energía asumida para cada país durante la realización del ensayo. Las normas base para este ensayo son ASTM D 1586, AASHTO T206.

4.5. Análisis de estabilidad de taludes

Los métodos de análisis de estabilidad de taludes tienen su base en los planteamientos físico-matemáticos en el que intervienen las fuerzas que estabilizan el sistema y fuerzas que desestabilizan el sistema, estas tienen incidencia en el talud y determinan su comportamiento y su condición estable. Los métodos que permiten realizar dicho análisis se pueden agrupar en métodos determinísticos dentro de los cuales están los métodos de equilibrio límite y los tenso-deformacionales; y métodos probabilísticos (Sanhueza Plaza, C., & Rodríguez Cifuentes, L., 2013). Sin embargo, parte de la evolución del análisis de estabilidad, es el enfoque a partir elementos finitos Whitman y Bailey (1967), estos establecieron criterios para que los métodos emergentes fueran de fácil acceso en el medio ingenieril. El método de elementos finitos representa un enfoque potente para el análisis de estabilidad de taludes ya que requiere menos datos de entrada, fundamentalmente con respecto al mecanismos de falla (Griffiths & Lane, 1999).

4.5.1. Métodos determinísticos para análisis de estabilidad de taludes

En los métodos determinísticos el factor de seguridad se encuentra en un rango de potenciales superficies de falla, determinando así la superficie del factor de seguridad mínimo, conocida como la superficie de deslizamiento crítica. Los métodos de equilibrio límite se encuentran dentro de la clasificación de los métodos determinísticos y están basados en el método de las dovelas, dividiendo la masa de suelo en dovelas o rebanadas. Un análisis de equilibrio límite permite obtener un factor de seguridad teniendo en cuenta los valores de la resistencia al cortante en el momento de la falla, una vez que se han determinado las propiedades de resistencia a cortante de los suelos y las propiedades geométricas del talud, se puede proceder a calcular el factor de seguridad (Lavista, M. M., & Piusseaut, E. T, 2019). Los métodos de equilibrio límite suponen que, en el caso de falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla y equivalentes a un factor de seguridad de uno ($FS=1$) (Suárez Díaz, 1998). Los métodos de equilibrio límite mayormente usados son método de Fellenius, Bishop simplificado, método de Taylor y el método de la espiral logarítmica. El método de Fellenius aplicado a suelos no

homogéneos y superficie de falla circular, en este se desprecian las fuerzas entre las dovelas, en el método de Bishop simplificado se tiene en cuenta el equilibrio de momentos y equilibrio de fuerzas, para este caso solo se requiere considerar fuerzas verticales, no obstante es un método bien aceptado y se usa principalmente en fallas circulares, sin embargo posterior a esto Bishop propone un método más riguroso donde se evidencia que es posible despreciar las fuerzas entre dovelas. Adicionalmente se tienen los métodos completos que permiten satisfacer tanto equilibrio de momentos como de fuerzas, en esta categoría se encuentra el método de Janbu, Morgenstern and Price's y Spencer, Estos métodos son aplicables tanto para superficies de falla circulares, como superficies de falla no circulares. Con el fin de aplicar estas metodologías a casos más específicos se han generado los métodos simplificados que ayudan al cálculo del factor de seguridad como lo es el método del talud infinito el cual toma como base los métodos de equilibrio limite y es aplicado a superficies de falla principalmente planar, (Huang, 1983).

4.5.2. Método de talud infinito probabilidad de falla

De acuerdo con (Posse, 1987) en los taludes donde la superficie de falla es paralela a la superficie del talud y la longitud de falla es larga comparada con su espesor, el cálculo del factor de seguridad medio del análisis de talud infinito es adecuado matemáticamente; el método se caracteriza por ser sencillo y se suponen condiciones de isotropía y homogeneidad.

El factor de seguridad se define como la relación entre la fuerza de resistencia debida a la resistencia al corte del suelo a lo largo de la superficie de falla, la fuerza motriz y el peso de la masa deslizante (Huang, 1983).

El modelo de talud infinito es un modelo ampliamente aceptado para el análisis de estabilidad de taludes en la práctica, (Cai et al., 2017). El cálculo se hace por medio de un análisis celda por celda y calculando la relación entre las fuerzas actuantes y las resistentes a lo largo del plano de falla. En los cálculos se desprecia el efecto de la fuerza horizontal entre tajadas, el cual se anula en forma aproximada entre tajada y tajada (Osorio, 2011). Se ha reconocido ampliamente que el modelo de talud infinito puede proporcionar información importante sobre los análisis de confiabilidad de

taludes(Griffiths, Huang, & Fenton, 2011), los términos que intervienen en los cálculos son los siguientes:

- La altura del primer estrato que define el plano de deslizamiento y que está determinado según la información geotécnica obtenida.
- La cohesión entre estratos, también definida por la información geotécnica.
- El coseno y el seno del ángulo de la superficie con la horizontal, el cual depende de la topografía.
- La aceleración sísmica, que esta descrita por curvas de isoaceleración, según amenaza sísmica.

El estudio de estabilidad de un talud infinito no discrimina la altura del mismo, este hecho permite que la estabilidad general pueda analizarse suponiendo un problema bidimensional por medio de un elemento ABCD del elemento deslizante por dos planos verticales a distancia a , (Figura 28) (Posse, 1987).

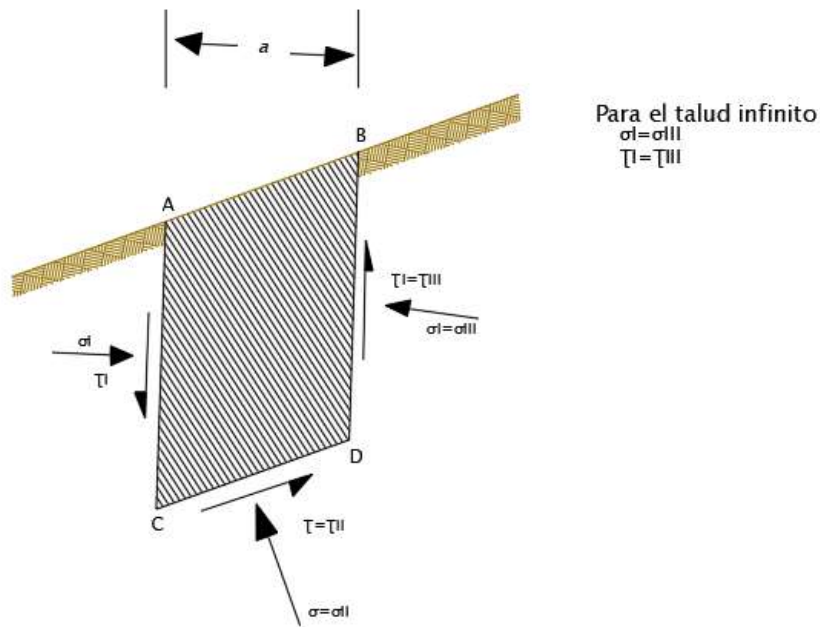


Figura 28. Grafica análisis de un talud infinito, esfuerzos sobre un elemento de suelo. Tomado de (Posse, 1987).

Las expresiones para el cálculo del factor de seguridad por el método de la falla del talud infinito está dada por la ecuación 18 (Derek H.Cornforth.Phd, 2005).

$$\text{Ecuación 10. } FS = \frac{C' + (Z \cdot \gamma \cdot \cos^2 \beta - Z \cdot \gamma - kh \cdot Z \cdot \gamma \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta - hw \cdot \cos^2 \beta) \cdot \tan \Phi}{Z \cdot \gamma \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta + kh \cdot Z \cdot \gamma \cdot kh \cdot Z \cdot \cos^2 \beta}$$

Donde:

β = Angulo de inclinación del plano de falla

C' = Cohesión del suelo

Φ = Angulo de fricción interna del suelo

γ = Peso específico del suelo

Z = Espesor del estrato blando

Kh = coeficiente sísmico horizontal

Hw = Altura del nivel de agua

4.5.3. Métodos probabilísticos para análisis de estabilidad de taludes

Los métodos probabilísticos para estabilidad de taludes, parten de la condición de los parámetros geotécnicos que por lo general son limitados en tamaño y calidad, la estadística en este tipo de datos permite determinar rangos aceptables para su tratamiento, Para muchas aplicaciones geotécnicas es útil hallar la distribución de frecuencia de las variables, (Lacasse et al., 2007).

Las funciones de probabilidad de las variables FDP aleatorias, son funciones asignadas a cada probabilidad de suceso de los parámetros a través de un histograma de frecuencias, con el fin de identificar las propiedades con grandes fluctuaciones en sus resultados y que dada esta situación guardan mejor relación con el análisis estadístico inductivo, con el fin de predecir de forma adecuada el comportamiento de dichas variables (Baecher & Christian, 2003).

Entre los métodos más utilizados en la estadística aplicada a la geotecnia están el método de Monte Carlo, el método de Primer Orden Segundo Momento FOSM y el método de estimativas puntuales (Rosenblueth, 1975). La estabilidad de taludes se mide generalmente en términos de factor de seguridad, en los métodos probabilísticos para la estimación de F.S, se determina su curva de distribución de probabilidad a partir del conocimiento de las distribuciones estadísticas de las variables de cohesión, ángulo de fricción, peso específico, etc. A partir de esta distribución se puede determinar la probabilidad de ruptura (P_r), definida como la parte del área bajo la curva de distribución de probabilidad del F.S. menor que 1,0 (Toro & González, 2012). El análisis probabilístico también puede ser realizado para superficies de deslizamiento arbitrarias, es decir, considerando diferentes superficies específicas de deslizamiento no asociadas con el factor de seguridad o índice de confiabilidad mínimos (Fernández et al., 2018).

Según (Jimenez, 2017), Para el cálculo de factores de seguridad es necesario contar con cuatro insumos mínimos con el fin de conocer los escenarios que representan las condiciones de estabilidad de un talud: 1) exploración del subsuelo, 2) ensayos de laboratorio para obtención de parámetros físicos y mecánicos del material, 3) topografía, 4). Condiciones de carga (Sismo y sobrecarga). Finalmente, el tipo de falla que se presente es característica principal para la escogencia del método de análisis de factor de seguridad.

4.5.4. Método de primer orden segundo momento (FOSM)

El método FOSM es usado ampliamente en estudios geotécnicos, corresponde a una categoría de métodos probabilísticos desarrollados a partir de la expansión de la serie de Taylor (Baecher & Christian, 2003), la determinación de la distribución de probabilidad para este método es expresadas por sus valores medios y desviaciones estándar (Maia & Assis, 2004).

El método FOSM permite determinar cuáles variables presentan mayor o menor influencia en la variación de las variables dependientes (Montoya & de Assis, 2011), La bondad del método es descrita por (Ruselli, 2008), como su exactitud para comportamiento lineal de las funciones, sin embargo (Harr, 1984), define como una desventaja del método su simplicidad y cierto grado de error, (Ruselli, 2008) también resalta como limitación del método el hecho de no poder definir la asimetría de la densidad probabilística.

4.5.5. Método de estimativas puntuales

El método de estimativas puntuales fue propuesto por Rosenbleuth, con el fin de obtener los momentos estadísticos de una función de comportamiento al evaluarla en un conjunto de puntos discretos escogidos específicamente (Baecher & Christian, 2003), Este método permite evaluar momentos estadísticos a partir de variables, de acuerdo con (Ruselli, 2008) Este método no requiere el conocimiento de la forma de la función de densidad de probabilidad de las variables aleatorias, lo que representa una ventaja para el método, sin embargo, no se obtiene información acerca de la forma de la función de densidad de probabilidad de la función de comportamiento y esto representa una limitación.

4.5.6. Probabilidad de falla

El concepto de probabilidad de falla es definido por (Christian et al., 1994), como la porción bajo la curva unitaria de la distribución de frecuencia, correspondiente a los valores del factor de seguridad por debajo de 1,0. El autor explica el concepto comparando dos casos hipotéticos A y B, en donde se tiene una mayor probabilidad de rotura para el caso B, en el que se tienen mayores valores de factor de seguridad y desviación estándar en comparación con el caso A, dicho ejemplo se representa en la siguiente gráfica.

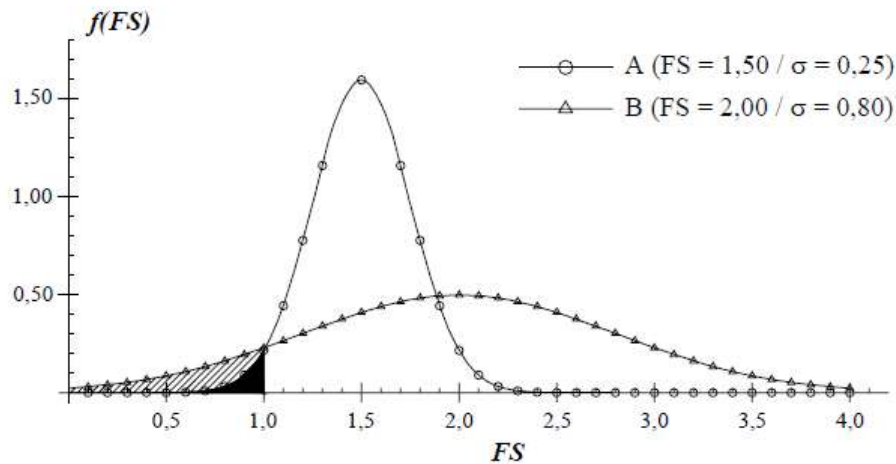


Figura 29. Distribución de frecuencias del factor de seguridad (Christian et al., 1994).

Adicionalmente (Vanmarcke, 1973) define la probabilidad de falla como el número de iteraciones con FS menor que 1,0 en relación con el total del número de iteraciones realizadas.

$$\text{Ecuación 11. } PF = \frac{P(FS < 1)}{\# \text{ evaluaciones realizadas}}$$

4.5.7. Método de Monte Carlo

El Método Monte Carlo es una técnica precisa y eficiente de búsqueda aleatoria, la cual puede ser empleada en diferentes ocupaciones. Como lo menciona (Greco, 1996) esta es una técnica basada en soluciones ensayo que son comparadas con la mejor solución que se tenga para mejorarla. (Gomez et al., 1992), (Marinilli, 2011), (Prada et al., 2011), entre otros, definen que el método de Montecarlo permite evaluar la integral de falla correspondiente a la función de estado límite.

Adicionalmente la simulación de Monte Carlo permite generar una gran cantidad de datos aleatorios, conociendo la distribución de probabilidad de las variables de ingreso (Fernández et al., 2018), el método permite generar simulaciones del comportamiento aleatorio de las variables (Sandoval Mendoza, 2015).

El método consiste en realizar un muestreo aleatorio de manera que se pueda simular el comportamiento de un sistema a medida que se tienen diferentes variables o diferentes escenarios de entrada. Estos datos de entrada obedecen a un valor real extraído de campo, el cual es el valor representativo del sistema (Sánchez-Silva, 2005), Para el caso, una vez obtenidos una serie de datos de campo como; cohesión, ángulo de fricción y peso unitario del suelo, se implementan las relaciones o expresiones matemáticas para la obtención del factor de seguridad, el proceso se repite muchas veces para obtener una función de densidad de probabilidad de la función de desempeño (Fernández et al., 2018), a medida que son producidos los datos se realiza por medio del método determinístico del talud infinito, el cálculo del factor de seguridad y el análisis de la probabilidad de falla (Cho, 2007), Una vez se realiza el procedimiento de cálculo de los factores de seguridad, se contabilizan los resultados que se encuentran por debajo del mínimo aceptable y se dividen entre el número total de iteraciones realizadas, de esta manera para el cálculo de la probabilidad de falla se habrán usado escenarios típicos basados en el comportamiento aleatorio de las variables (Voss, 2013). Para el presente estudio se define entonces el uso de este método probabilístico.

4.6. Conceptos de probabilidad y estadística para tratamiento de datos usados en los análisis de estabilidad

El uso de recursos estadísticos para la solución de problemas geotécnicos de estabilidad de taludes se basa en su buen comportamiento para desarrollar nuevas teorías y perfeccionar análisis existentes haciendo uso de una gran variabilidad de datos que tienen como característica principal su heterogeneidad (Jimenez, 2017).

Teniendo en cuenta que las variables requeridas para el análisis son aleatorias y su comportamiento analizado en los resultados de laboratorio consiste en que los valores arrojados no son iguales, se considera que estas variables están definidas sobre un espacio muestral que asigna una probabilidad a cada posible evento (Meyer, 1992). En las variables aleatorias no se puede conocer con certeza el rango de valores que tomarán, por lo tanto, el resultado entonces estará asociado a una posible probabilidad (Canavos, 1988).

Las variables obtenidas de ensayos de laboratorio para suelos tienen mejor correlación con parámetros estadísticos como la desviación estándar S , Valor medio X , asimetría Vx y el coeficiente de correlación r (Phoon & Kulhawy, 1999).

A continuación, se presentan los conceptos básicos de probabilidad y estadística para el uso de datos obtenidos mediante análisis del subsuelo.

Los métodos estadísticos, se caracterizan porque dependen de las particularidades de la media, y los valores de la variable mínimos y máximos (Vivanco, 2005), es por esto que definir el ajuste de los datos a la función de probabilidad para el método estadístico, se considera como premisa importante para evaluaciones estadísticas, la función de probabilidad de una variable aleatoria X se define como la que asocia la probabilidad P a cada valor posible de X ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$) (Cardona et al., 2012), se cumple siempre que:

$$\text{Ecuación 12. } 0 \leq P \leq 1 \text{ donde } P_1 + P_2 + P_3 \dots \dots + P_n = \sum_i p_i = 1$$

Según algunos autores como (Low & Tang, 1997), (Griffiths, Huang, & Dewolfe, 2011), (Viviescas & Osorio, 2017) es importante resaltar que cuando se tienen valores altos para las variables como ángulo de fricción, cohesión altos, los resultados de factor de seguridad tendrán tendencia a aumentar.

4.6.1. Variable estadística

La variable aleatoria permite relacionar el espacio muestral con un subconjunto de los números reales (Meyer, 1992). Una variable estadística puede ser cualitativa cuando se trata aquellas que no necesitan números para expresarse o cuantitativa cuando se trata de propiedades medibles numéricamente estas últimas son las que representan el tipo de datos a analizar en el trabajo que se desarrolla en este texto, las variables cuantitativas estas pueden ser a su vez discretas o continuas, estas últimas pueden tomar cualquier valor numérico, entero o decimal, de forma que teóricamente entre dos valores posibles siempre se pueden encontrar otros. (Escalona & Gómez, 2012). Adicionalmente se conoce que las variables tienen correlación entre ellas lo que las enmarca en variables independientes y dependientes, Una variable independiente es una que se introduce y causa un resultado particular. Es un estímulo que condiciona una respuesta, que se puede modificar para afectar un resultado. Una variable dependiente es el resultado, el cual es causado por la independiente. Este es el efecto, la consecuencia de o la respuesta a la variable independiente, (Gamboa, 2017).

Cuando se tienen variables de tipo aleatorio esta estará definida matemáticamente sobre un espacio muestral y a esta se le establece una probabilidad a cada evento aleatorio dentro de dicho espacio, es decir, es una variable cuyo valor o rango de valores no pueden predecirse con certeza, solamente con una probabilidad asociada que describe el posible resultado (Russelli, 2008).

4.6.2. Variable continua

Una variable continua puede tomar cualquier valor en un intervalo de los números reales; a diferencia de la discreta, la continua, además de valores enteros, puede tomar valores racionales e irracionales (Canavos, 1988).

4.6.3. Valor medio muestral

Es el promedio aritmético de un conjunto de datos (Baecher & Christian, 2003), donde el número de observaciones n están denotados por x_1, x_2, \dots, x_n .

$$\text{Ecuación 13. } \bar{x} = \frac{x_1+x_2+\dots+x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

4.6.4. Varianza muestral

Por medio de la cual se describe la dispersión de los datos observados alrededor de la media donde el número de observaciones n están denotados por x_1, x_2, \dots, x_n .

$$\text{Ecuación 14. } S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

4.6.5. Coeficiente de variación muestral

Esta es una medida de dispersión adimensional para evaluar el error muestral de la desviación estándar, se denota como CV y puede decirse que cuando se tiene menor varianza muestral hay mayor homogeneidad en los datos.

$$\text{Ecuación 15. } CV = \frac{S}{\bar{x}}$$

Coeficiente de asimetría

Es un indicador del grado de asimetría que presenta una distribución de probabilidad de una variable aleatoria a su valor medio, cuando el valor del coeficiente de asimetría es cercano a cero se tiene una distribución simétrica, de tener valores diferentes a cero se estima que la simetría es positiva o negativa (Joanes & Gill, 1998).

$$\text{Ecuación 16. } V_x = \frac{1}{S^3} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3$$

Cuando el valor del coeficiente de asimetría es cercano a cero la distribución de probabilidad es simétrica, en caso contrario esta simetría puede ser positiva o negativa (Figura 30).

Tipos de asimetría

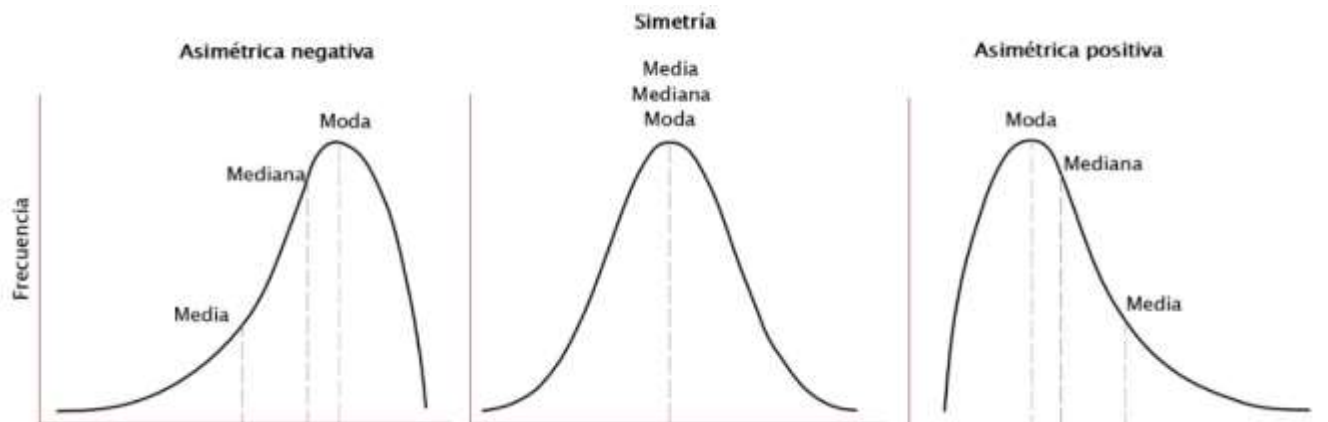


Figura 30. Graficas tipo de asimetría de una distribución de probabilidad.

4.6.6. Covarianza

Una medida típica de la fuerza de relación entre dos variables es la covarianza, Esta mide la linealidad y el grado de dependencia de las variables aleatorias analizadas X e Y dentro de un grupo n de observaciones (Griffiths & Fenton, 2007)

$$\text{Ecuación 17. } S_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_i^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

4.6.7. Distribuciones de probabilidad

la distribución de probabilidad de una variable aleatoria es una función que asigna a cada suceso definido sobre la variable la probabilidad de que dicho suceso ocurra (Velásquez & Velásquez, 2012), existen varias distribuciones de probabilidad, algunas de las comunes son la distribución normal estándar, la distribución lognormal, distribución de Poisson y distribución t de Student. (Brizuela, 2017). En cuanto a las distribuciones de probabilidad (Ruselli, 2008), (Montoya & de Assis, 2011) entre otros, expresan que los parámetros de resistencia del suelo tienden a ajustarse a la distribución normal, adicionalmente (Baecher & Christian, 2003), (Nadim, 2007), (Ruselli, 2008), definen que la distribución log normal es generalmente aceptada para modelar algunas propiedades típicas del suelo debido a que admite valores estrictamente positivos, adicionalmente cuando el coeficiente de variación es mayor al 30% esta distribución provee una forma razonable. Por otro lado (DNV, 2012) define que dentro del contexto de los suelos los modelos de distribución genérica de mayor uso son la distribución normal y log normal.

Un numero pequeño de distribuciones puede ser aplicado para resolver problemas de variables aleatorias continuas, las siguientes distribuciones se ajustan bien a las aplicaciones de la ingeniería geotécnica; Exponencial, Gama, Uniforme, Normal y Lognormal, (Griffiths & Fenton, 2007).

4.6.8. Distribución Gamma

La distribución gamma debe su nombre a la función gamma, presentada en primera instancia por Leonard Euler entre los años 1730 y 1731, es también conocida como una generalización de la distribución exponencial, además de la distribución de Erlang y Ji-cuadrada, esta distribución es aplicable a variables continuas con asimetría positiva y/o los experimentos donde se involucre el tiempo (Ecos de la economía, 2013), es decir que el uso de esta distribución tiene un comportamiento adecuado para variables continuas, dado que estas representan una gran densidad de sucesos (Arroyo et al., 2014).

Una variable aleatoria X tiene una distribución de probabilidad gamma si su función de densidad está dada por:

$$\text{Ecuación 18. } f(x, \alpha, \beta) = \left\{ \frac{1}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \alpha^{-1} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \right\}, \text{ Para } x > 0; \alpha, \beta, > 0;$$

4.6.9. Distribución Exponencial

La distribución exponencial se difiere de la distribución gamma en que el parámetro α es igual a 1, adicionalmente esta distribución también es una generalización de la distribución de Erlang, siendo así un caso especial de la distribución gamma, esta distribución es aplicada principalmente para determinar la probabilidad de que en cierto tiempo ocurra un evento. (Arroyo et al., 2014).

$$\text{Ecuación 19. } f(x, \lambda) = \left\{ \begin{array}{ll} \lambda e^{-\lambda x} & \text{Si } x > 0, \lambda > 0; \\ 0, & \text{de otro modo} \end{array} \right\}$$

4.6.10. Distribución normal

La distribución normal es posiblemente la probabilidad más usada e importante al día de hoy dado que gran parte de los fenómenos naturales se ajustan a dicha probabilidad (Griffiths & Fenton, 2007). Para las variables (cohesión, ángulo de fricción, peso unitario), (Suarez-Burgoa, 2016) indica que la función de probabilidad que más se ajusta es la distribución normal, la cual genera una distribución gaussiana simétrica de los valores respecto a un valor medio.

Las distribuciones de probabilidad al trabajar con variables aleatorias toman cada variable como un suceso (cada valor de esta variable define un suceso diferente), y le asignan una probabilidad de ocurrencia a cada suceso.

$$\text{Ecuación 20. } f(x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(x-\bar{x})^2}{2s^2}\right]$$

4.6.11. Distribución log normal

La distribución logarítmica normal surge de la distribución normal a través de una transformación simple, aunque no lineal (Griffiths & Fenton, 2007). Se dice que una variable aleatoria tiene una distribución log normal si su logaritmo se distribuye normalmente, la función para esta probabilidad está definida por la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 21. } f(x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\ln x - \bar{x})^2}{2s^2}\right] \text{ si } x > 0$$

$$\text{Ecuación 22. } f(x) = 0 \quad \text{si } x \leq 0$$

En el caso puntual de las propiedades del suelo que tienen injerencia en la presente investigación, las distribuciones de probabilidad con mayor ajuste según la literatura son las presentadas en la tabla 3, sin embargo, es importante recalcar, la necesidad de evaluar para cada variable, el ajuste de distribución de probabilidad, con el fin de entender de manera precisa el comportamiento estadístico de estas.

Tabla 3. Algunas distribuciones probabilísticas de parámetros geotécnicos
(García., et al 1991) y (Lacasse & Nadim, 1997)

Propiedad del suelo	Tipo de suelo	Distribución de probabilidad
Peso unitario sumergido	Todos	Normal
Resistencia al corte no drenado	(Arcillas triaxiales)	(Ensayos triaxiales) Log Normal
	Arcilla Su	Log Normal
	Limo Arcilloso	Normal
Resistencia al corte no drenado normalizado	Arcilla	Normal-LogNormal
Cohesión		Normal
Rumbo y buzamiento de discontinuidades		Normal

Cabe resaltar que existen distintas probabilidades que son aplicables a parámetros geotécnicos para estabilidad de taludes, como lo son la distribución Gamma, exponencial, entre otras.

4.6.12. Valor esperado

Con cada distribución de probabilidad, hay asociado un parámetro llamado valor esperado, también conocido como esperanza matemática, valor promedio o media, el valor esperado de una variable aleatoria permite establecer el valor sobre el cual se centra la distribución de la probabilidad (Walpole, 1990). Sin embargo, definir la distribución de probabilidad requiere el uso de otros conceptos estadísticos como la varianza.

4.6.13. Función de densidad de probabilidad

En el caso de variables continuas, dicha probabilidad puede ser descrita por la función de densidad de probabilidad $f_X(x)$, abreviada PDF, cuya relación con la función de distribución $F_X(x)$ está dada por la ecuación 16, así mismo su representación gráfica se expresa en (Figura 31).

$$\text{Ecuación 23. } f_X(x) = \frac{dF_X(x)}{dx}$$

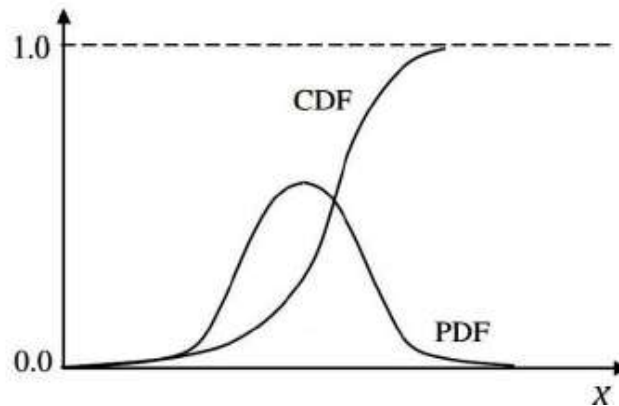


Figura 31. Gráficas función de probabilidad y función de probabilidad acumulada (Ruselli, 2008)

4.6.14. Función de distribución acumulada

La función de distribución de probabilidad $F_X(x)$, también llamada función de distribución acumulada (CDF), describe la probabilidad de que una variable aleatoria X tome un valor menor o igual que un número x para cada valor de x (Meyer, 1992); esta se define por:

$$\text{Ecuación 24. } F_X(x) = P(X \leq x)$$

4.6.15. Método de máxima verosimilitud

El método de máxima verosimilitud se usa para estimar los parámetros de una distribución dada una muestra finita de datos. El objetivo de este método es encontrar los valores de θ que maximizan a $L(\theta|x)$ o a $l(\theta|x)$, los valores encontrados se representan usualmente por $\hat{\theta}$.

La incorporación de información previa al criterio de máxima verosimilitud, como lo son la muestra de datos y su comportamiento estadístico permite generalizarlo mediante un enfoque Bayesiano, manteniendo el modelo determinista (Ledesma Villalba, 1987).

La función de verosimilitud para un vector de parámetros θ dada una muestra aleatoria $x=(x_1, \dots, x_n)^T$ con una distribución asumida se define usualmente como:

$$\text{Ecuación 25. } L(\theta|x) = \prod_{i=1}^n f(x_i | \theta),$$

donde x_i representa uno de los elementos de la muestra aleatoria y $f(\cdot)$ es la función de masa/densidad de la distribución de la cual se obtuvo x .

4.6.16. Pruebas de normalidad

Una forma menos subjetiva de explorar la normalidad de un conjunto de datos es por medio de las pruebas de normalidad. Las hipótesis para este tipo de pruebas son:

H0: la muestra proviene de una población normal.

HA: La muestra NO proviene de una población normal.

En la literatura estadística se reportan varias pruebas, algunas de ellas se listan a continuación.

4.6.17. Test de Cramer-von Mises

Uno de los criterios más utilizados para comparar funciones es el introducido por los investigadores Harald Cramer Richard Edler von Mises y conocido como criterio de Cramer–von Mises (CM) siendo aplicado a problemas que van desde la bondad de ajuste de una distribución hasta la comparación de la igualdad entre cópulas (Martínez-cambor, et al 2012). El estimador de Cramer von Mises acepta o rechaza la hipótesis nula H0: "los datos provienen de una distribución conocida X", mediante la comparación de la función de distribución empírica de los datos, denotada F_n , y la función de distribución teórica F_0 . El estimador CVM_n definido a continuación calcula la distancia entre las dos funciones, de modo que H0 debe aceptarse para valores de CVM_n pequeños (Mantilla, 2016)

$$\text{Ecuación 26. } CVM_n = n \int_{-\infty}^{\infty} [F_n(x) - F_0(x)]^2 dF_0(x)$$

Donde n denota el número de datos.

4.6.18. Test de Kolmogórov-Smirnov

La prueba Kolmogórov-Smirnov ampliamente estudiada bajo el supuesto de que la CDF teórica subyacente, $F(x)$, es continua, el estadístico de Kolmogórov-Smirnov (K-S) de dos caras es uno de los estadísticos de prueba de bondad de ajuste más populares que se utiliza para medir qué tan bien se distribuye una muestra aleatoria (Dimitrova et., al 2020). Esta prueba no paramétrica de bondad de ajuste, que sirve para contrastar la hipótesis nula de que la distribución de una variable se ajusta a una determinada distribución teórica de probabilidad, (Berlanga & Rubio, 2012).

La prueba está basada en la máxima diferencia entre una distribución acumulativa hipotética. Donde el D_n de K-S permite cuantificar la distancia entre la función de distribución empírica del conjunto de datos y la distribución acumulada.

$$\text{Ecuación 27. } D_n = \sup [F_n(x) - F(x)]$$

Donde:

n es el tamaño de la muestra, $F_n(x)$ denota la función de distribución empírica (acumulativa) (edf) de $\{X_1, \dots, X_n\}$ y $F(x)$ denota la función de distribución acumulada (CDF) de una distribución teórica preespecificada bajo la hipótesis nula (H_0) de que la muestra $\{X_1, \dots, X_n\}$.

Basado en la prueba de normalidad K-S, Lilliefors ha calculado la distribución D , para muestras de pequeño tamaño procedentes de una población normal de la que no se conocen sus parámetros para determinación gráfica, los valores máximos de D_n están expresados en la tabla 4, para los casos en los que n es mayor a 30 (I Massons, 1970).

Tabla 4. Niveles de significancia Kolmogórov
(I Massons, 1970).

Tamaño de la muestra	Lilliefors	
	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,01$
Superior a 30	$0,886/\sqrt{n}$	$1,031/\sqrt{n}$

La toma de la decisión en el contraste anterior puede llevarse a cabo también mediante el empleo del p-valor asociado al estadístico D observado. El p-valor se define como: $p\text{-valor} = P(D \leq \text{obs} | H_0)$. Si el p-valor es grande significa que, siendo cierta la hipótesis nula, el valor observado del estadístico D era esperable. Por tanto, no hay razón para rechazar dicha hipótesis. Asimismo, si el p-valor fuera pequeño, ello indicaría que, siendo cierta la hipótesis nula, era muy difícil que se produjera el valor de D que efectivamente se ha observado (Jiménez, 2011).

4.6.19. Criterios para la clasificación del factor de seguridad y probabilidad de falla

Definir la probabilidad de falla máxima que puede tolerar un sistema es una tarea un tanto difícil ya que actualmente no existe un consenso específico para este tema (Fernández et al., 2018), sin embargo la metodología definida por (USACE, 1999), es la más conocida y se presenta en la (tabla 5).

Tabla 5. Clasificación de la amenaza de un talud ante un deslizamiento (USACE, 1999)

Desempeño esperado	Índice de confiabilidad	Probabilidad de falla (%)
Alto	5	3×10^{-5}
Bueno	4	3×10^{-3}
Sobre el promedio	3	10^{-1}
Bajo el promedio	2.5	6×10^{-1}
Pobre	2	2.3
Insatisfactorio	1.5	7
Peligroso	1	16

Para Colombia, de acuerdo con el Servicio geológico Colombiano para la estimación de la amenaza se debe determinar el factor de seguridad, este factor basado en el método de equilibrio límite, que para el caso será el método de talud infinito ya antes descrito en el presente trabajo, Así el nivel de amenaza basado en el valor de factores de seguridad se detalla en la (Tabla 3-11) de la guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del Servicio geológico colombiano y (Tabla 6) del presente documento, en este se clasifican los factores de seguridad como amenaza baja, media o alta dependiendo del valor arrojado posterior al cálculo realizado por el método del talud infinito.

Tabla 6. Clasificación de la amenaza de un talud ante un deslizamiento (Servicio Geológico Colombiano, 2017)

Nivel de amenaza	Factor de seguridad
Alta	<1.1
Media	1.1-1.5
Baja	>1.5

En lo que tiene que ver con la estimación y clasificación de la probabilidad de falla, está dada en el presente trabajo de acuerdo con el capítulo de análisis detallado del (Servicio Geológico Colombiano, 2017) bajo métodos probabilísticos, el nivel de amenaza se puede clasificar en alto, medio y bajo, con base en la probabilidad anual de falla (tabla 3-13) tomada de la guía metodológica del servicio Colombiano y expresada en este documento en la (Tabla 7).

Tabla 7. Criterio para la clasificación de la amenaza en función de la probabilidad de falla.

Nivel de amenaza	Probabilidad anual de falla
Baja	<0,001
Media	0,001-0,16
Alta	>0,16

5. Metodología

La metodología aplicada en el presente estudio es de tipo cuantitativo y correlacional basada en variables definidas a través de datos recopilados, tanto en laboratorio como en campo durante la prospección geotécnica realizada por la empresa Quasar ingenieros consultores s.a.s. Estos datos se examinaron de manera numérica y estadística enfocados en obtener la relación entre los parámetros geotécnicos y la ocurrencia de falla planar en los taludes de la comuna universitaria. A continuación, se describe detalladamente esta metodología:

5.1. Recopilación de información, Parámetros de campo y laboratorio

Se usaron los datos obtenidos de 79 estudios desarrollados mediante consultorías geotécnicas realizadas por la empresa Quasar ingenieros consultores S.A.S de la ciudad de Manizales, dichos estudios fueron ejecutados para entidades públicas y privadas, la información recopilada es de los últimos 14 años en la zona de interés, los datos extraídos incluyen; registros de sondeos y resultados de ensayos de laboratorio de suelos, adicionalmente se utiliza archivo topográfico de la Alcaldía de Manizales para obtención de rangos de pendientes.

5.2. Tratamiento estadístico a las variables

En este estudio las variables analizadas corresponden a cohesión, ángulo de fricción, peso unitario, espesor del estrato blando (Lleno o ceniza), y Altura del NF. Lo primero que se debe señalar es que estas variables son continuas; es decir, pueden tomar cualquier valor dentro de un intervalo dado. Para los datos requeridos se incluye un tratamiento estadístico que consiste en la obtención de la media, desviación estándar, coeficiente de asimetría, valor mínimo, valor máximo y coeficiente de variación.

La forma como se trataron los datos fue mediante histogramas, con el fin de conocer la consistencia de los resultados de laboratorio, definir la tendencia y los posibles errores durante la obtención. Este método es utilizado dado que los resultados de laboratorio no son iguales en todos los casos y por esto es necesario usar este tipo de métodos (Aristizabal, 2017).

5.3. Obtención de distribución de probabilidad de las variables

La obtención de la distribución de probabilidad a la que se ajusta cada variable, se realiza a partir de una serie de acciones tales como; Revisión bibliográfica de las distribuciones de probabilidad aplicables aplicable enfoque del presente estudio y tipo de variable, chequeo de los datos y su distribución por medio del concepto de máxima verosimilitud, chequeo del ajuste de los datos a distribuciones típicas mediante el test de Cramer von mises y test de kolmogorov smirnov, realizadas en el programa computacional R, adicionalmente se realiza la obtención de la función de densidad de cada variable, en esta se evidencia por medio de histogramas la distribución que siguen los datos y se realiza la comparación con distribuciones en las que se tienen mayor ajuste.

5.4. Cálculo del factor de seguridad y probabilidad de falla

Una vez obtenidas las distribuciones a las que se ajustan las variables se procede a obtener los factores de seguridad por medio del método de Montecarlo basado en la teoría del talud infinito y descrito en el capítulo 4.5.2 del presente documento, la generación de números aleatorios se realiza para 5000 iteraciones, Una vez empleado el método de Monte Carlo, se realizó un complemento estadístico que permite determinar la probabilidad de falla del talud partiendo del concepto del factor de seguridad, finalmente se procede a clasificar los factores de seguridad y probabilidades de acuerdo a la normatividad Colombiana definida por el Servicio Geológico Colombiano.

6. Análisis de resultados

6.1. Parámetros geotécnicos

Algunos parámetros geotécnicos de los depósitos blandos tipo ceniza volcánica y rellenos presentes en la comuna Universitaria de la ciudad de Manizales se presentan en la Tabla 8 tales como el espesor del estrato blando obtenidos por medio de la prospección de campo, clasificaciones para conocer el tipo de suelo y parámetros físicos y mecánicos obtenidos a partir de ensayos tipo corte directo (U.U). Específicamente, el espesor varía entre 1.20 m y 9.0 m, mientras que los tipos de suelos varían entre MH, SM y ML. los parámetros físicos y mecánicos como el peso húmedo entre 1.109 gr/cm^3 y 1.976 gr/cm^3 , la cohesión entre 0.83 t/m^2 y 8.0 t/m^2 , y el ángulo de fricción entre 13.75° y 38.53° .

Tabla 8. Parámetros físicos, mecánicos en condiciones no drenadas y espesores de estratos blandos Comuna Universitaria de Manizales

#	Año	ubicación	Prof. ensayo (m)	Peso húmedo (gr/cm ³)	Cohesión (t/m ²)	Angulo de fricción (°)	Espesor estrato blando (m)	Clasificación SUCS	Prof . Naf
1	2006	Calle 65 No 31-61 Fátima	-6	1,599	3,8	28,04	8	MH	NO
2	2006	Calle 69 No 32-55 Fátima 3	-6	1,685	6,4	33,81	6	MH	2.5
3	2006	Cra. 40B No 73-30	-4	1,590	2,1	33,09	4	MH	1
4		Aranjuez	-5	1,719	3,5	30,24	5	MH	2.5
5	2006	Vía Panamericana- sector piscina de Aranjuez	-4	1,680	3.0	38,53	4	MH	NO
6	2006	Cra. 35 a No 61-29	-5	1,714	5.0	33,57	8	MH	1
7	2006	Fátima	-6	1,306	5,5	26,34	8	MH	1
8	2008	Calle 64 cra. 36 Pío XII	-6	1,537	5.0	28,39	6	MH	2
9			-7	1,699	3.0	36.00	8	MH	NO
10	2006	Sondeos Barrio Malhabar	-9	1,600	4.0	35,50	4,5	MH	NO
11	2006	Calle 65 No. 30-41 Barrio Fátima	-5	1,573	7,4	25,88	6	MH	3
12			1,5	1,751	4,1	22,15	2,5	MH	NO
13			-3	1,634	6,1	26,05	4,2	MH	1
14	2007	Sondeos Barrio Malhabar	-6	1,610	3,5	29,32	4,5	MH	3
15	2008	Prospección Calle 64 Cra 37 B. Kennedy	-9	1,733	3,5	27,46	4,8	MH	NO
16			-3	1,109	6,5	30,06	2	MH	NO
17	2009	Cra 38 a No 50-3a Fátima	-9	1,589	9,8	20,48	9,0	MH	3
18			-6	1,470	4.0	22,27	7	MH	NO

#	Año	ubicación	Prof. ensayo (m)	Peso húmedo (gr/cm ³)	Cohesión (t/m ²)	Angulo de fricción (°)	Espesor estrato blando (m)	Clasificación SUCS	Prof . Naf
19			8	1,493	8.0	28,04	9,0	MH	3
20	2009	Prospección sector Aguacate (Fátima)	-2	1,733	4.0	22,46	2,5	MH	NO
21			-2,5	1,321	4,5	27,46	3	MH	NO
22	2009	Escuela Superior de Administración Pública (Fátima)	-2	1,820	5.0	33,57	6	SM	NO
23			-4	1,348	5,5	25,19	1,2	MH	2
24	2009	Sondeos Fátima K	-7	1,786	6.0	28.00	7,6	MH	1.5
25	2010	Cra 43 No 68C-74	-4	1,777	2,9	27,28	8	ML	1
26	2010	Cra 40 No. 55-49, Barrio Camilo Torres	-2	1,556	4,4	24,81	6	SM	NO
27			-1,5	1,801	2,9	25,58	6	SM	NO
28			-5,5	1,634	2.0	25,44	6	MH	1.5
29			-4	1,668	5,3	23,22	6	MH	1
30	2011	Prospección puente peatonal Terminal los cámbulos (límite Aranjuez)	-11	1,976	4,8	26,33	4,5	ML	3
31			-9	1,531	4,2	19,78	4,5	MH	NO
32	2012	Calle 65A N.º 35-54 supermercado Maná (Fátima)	-8	1,472	2,1	23,25	7,6	MH	2.5
33	2014	Calle 66 No 30-03 Fátima	4	1,890	4,1	29,53	4,2	MH	NO
34	2014	Sondeo Barrio Betania	-1,5	1,796	4,3	18,12	1,7	MH	NO
35	2015	Cra 36 No 63-18 Fátima	-4	1,701	2.0	35,14	3,6	MH	1
36	2015	Prospección Talud posterior etapa III Centro Cultural Universidad de Caldas	-8	1,766	1,9	14,05	9	MH	4

#	Año	ubicación	Prof. ensayo (m)	Peso húmedo (gr/cm ³)	Cohesión (t/m ²)	Angulo de fricción (°)	Espesor estrato blando (m)	Clasificación SUCS	Prof . Naf
37	2016	Universidad Nacional campus El Cable	-4	1,626	2,3	16,95	4	MH	NO
38	2016	Universidad Nacional campus El Cable	-4	1,856	5,0	19,53	4	MH	2
39	2016	Universidad Nacional campus El Cable	-3	1,942	6,1	32,40	3,5	MH	NO
40	2017	Prospección Jardín Botánico U. de Caldas	3,5	1,566	3,0	18,50	4	MH	1.3
41			3	1,625	5,2	20,57	4	MH	1
42	2017	Prospección Fátima	-3	1,759	2,8	26,80	3,6	MH	1.5
43	2018	Prospección Barrio Aguacate 1	-2	1,576	1,2	33,42	3	SM	NO
44			-2,5	1,738	7,5	24,19	3	MH	NO
45	2018	Prospección Barrio Carrilera Sitio 2	-1,5	1,701	4,0	21,06	1,5	MH	NO
46			-1	1,755	3,0	23,23	1,5	MH	NO
47	2018	Prospección Barrio Carrilera Sitio 3	-4	1,743	6,2	23,31	6	MH	2
48	2018	Prospección Barrio La Carrilera Sitio 4	-2	1,877	5,9	32,62	3	ML	NO
49			-3,5	1,635	4,0	22,79	4	MH	1
50	2018		-2,5	1,814	4,5	23,23	3	ML	1.2
51			-2	1,889	4,9	22,25	2,5	MH	NO
52			-2	1,611	1,5	34,99	2	MH	1
53		Prospección Barrio Las Colinas	-2,5	1,603	1,2	33,42	2,8	SM	2
54			-3	1,483	3,5	15,37	3	MH	1
55			-2,2	1,655	2,5	28,37	2,5	MH	NO
56			-2,5	1,678	4,2	28,60	2,8	MH	2.2

#	Año	ubicación	Prof. ensayo (m)	Peso húmedo (gr/cm ³)	Cohesión (t/m ²)	Angulo de fricción (°)	Espesor estrato blando (m)	Clasificación SUCS	Prof . Naf
57			-2,8	1,748	4,2	23,17	3	MH	2
58			-3	1,631	3,9	18,51	3	MH	1.5
59	2018	Prospección Barrio Nuevo Fátima 1	-2	1,845	7,7	23,59	2	MH	NO
60			-2,5	1,732	6,8	22,81	2,5	MH	NO
61	2018	Prospección Barrio Nuevo Fátima 2	-1,5	1,686	2,7	25,37	1,5	MH	NO
62	2018	Prospección ISTC	-4	1,614	3,0	31,42	6,5	MH	1
63			-3,8	1,511	4,3	22,20	6	MH	2.2
64			-4	1,840	3,4	30,57	6,7	ML	1
65	2018	Calle 62 No 33-52 Betania	-3,5	1,410	1,9	14,98	5	MH	NO
66	2018	Prospección Barrio Kennedy	-5	1,659	7,5	18,52	6,3	MH	1
67			-4,5	1,701	2,5	21,18	5,5	MH	NO
68			-4	1,549	6,7	34,24	4,5	MH	NO
69	2018	Prospección contigua ESAP (Fátima)	-5	1,684	3,4	26,80	7,5	MH	3
70	2018		-1,8	1,729	1,6	21,34	2	MH	NO
71			-3,8	1,732	6,1	20,26	4	MH	1.5
72		Prospección Barrio Fátima	-4	1,861	0,83	19,80	5	MH	NO
73			-4,2	1,513	3,4	28,37	4,8	MH	2.3
74	2018	Calle 67 No 31A-01	-3,5	1,683	6,1	32,62	6	MH	NO
75	2019	Sondeos Barrio Malhabar	1,5	1,625	3,6	13,75	1,5	MH	NO
76			-2	1,789	2,8	23,51	3	MH	NO

#	Año	ubicación	Prof. ensayo (m)	Peso húmedo (gr/cm ³)	Cohesión (t/m ²)	Angulo de fricción (°)	Espesor estrato blando (m)	Clasificación SUCS	Prof . Naf
77	2020	Cra33 # 65-54, Fátima	-2,1	1,470	6,3	15,20	9	MH	NO
78			-3,1	1,634	5,6	30,87	9	MH	1
79			-4,1	1,461	2,6	29,02	9	MH	2

6.2.Tratamiento estadístico de las propiedades físicas y mecánicas.

Los resultados del tratamiento estadístico de las propiedades físicas y mecánicas correspondiente al tamaño, medidas de tendencia central, de posición, forma y dispersión de algunos parámetros físicos y mecánicos de los suelos analizados se presentan en la Tabla 9, en la cual se resumen los resultados de valor mínimo, valor máximo, media, desviación estándar y coeficiente de asimetría para los parámetros de peso unitario, cohesión y ángulo de fricción en una muestra de 79 estudios geotécnicos.

Tabla 9. Resultados tratamiento estadístico de las variables peso unitario, cohesión y ángulo de fricción.

Parámetro	Tamaño muestra	Valor mínimo	Valor máximo	Media	Desviación estándar	Coficiente de asimetría	Coficiente de variación
Peso unitario (gr/cm³)	79	1,11	1,98	1,66	0,15	-0,74	0,09
Cohesión (t/m²)	79	0,83	9,80	4,25	1,82	0,49	0,43
Ángulo de fricción (°)	79	13,75	38,53	25,75	5,79	0,00	0,22

6.3.Verificación de Ajuste de las distribuciones de probabilidad

Con el fin de conocer el ajuste a distribuciones tales como distribución normal, distribución log-normal, distribución exponencial y distribución Gama, a la que se ajustan cada una de las variables peso unitario húmedo, cohesión y ángulo de fricción se usó de manera inicial el método de máxima verosimilitud con el fin de determinar los parámetros de cada una de las distribuciones de probabilidad , en las tabla 10, 11 y 12 se presenta el resultado del método realizado a través de la función de log-verosimilitud y estimadores por el método de máxima verosimilitud del software R., en el que se obtiene que el menor error define el ajuste de la variable con la distribución correspondiente, evaluado para los test de Kolmogórov Smirnov y Cramér-von Mises.

Tabla 10. Resultados estadísticos de Cramér-von Mises y estadístico de Kolmogórov Smirnov, a partir de la evaluación de máxima verosimilitud para el parámetro peso unitario húmedo.

Distribución	Parámetro	Peso	Estadístico de Cramer-von Mises	Estadístico de Kolmogorov Smirnov
Normal	PUH		0,06541311	0,069315
Log- normal	PUH		0,1202045	0,086915
Gamma	PUH		0,1490538	0,095375
Exponencial	PUH		6,561323	0,53489

En la tabla 10 se evidencia que para el parámetro peso unitario húmedo las distribuciones con mayor similitud son la distribución normal, log normal y gamma, dado que se tienen menores valores de p asociados a los test de Cramer-von Mises y del estadístico de Kolmogórov Smirnov.

Tabla 11. Resultados estadísticos de Cramér-von Mises y estadístico de Kolmogórov Smirnov, a partir de la evaluación de máxima verosimilitud para el parámetro ángulo de fricción.

Distribución	Parámetro ángulo de fricción	Estadístico de Cramer-von Mises	Estadístico de Kolmogórov Smirnov
Normal	Fricción	0,04675787	0,058073
Log normal	Fricción	0,04166017	0,0761
Gamma	Fricción	0,07101213	0,07617
Exponencial	Fricción	4,543872	0,42836

En la tabla 11 se evidencia que para el parámetro ángulo de fricción las distribuciones con mayor similitud son la distribución normal, log normal y gamma, dado su valor mínimo de error.

Tabla 12. Resultados estadísticos de Cramér-von Mises y estadístico de Kolmogórov Smirnov, a partir de la evaluación de máxima verosimilitud para el parámetro cohesión.

Distribución	Parámetro cohesión	Estadístico de Cramer-von Mises	Estadístico de Kolmogórov Smirnov
Normal	Cohesión	0,03814291	0,062902
Log normal	Cohesión	0,08147451	0,082257
Gamma	Cohesión	0,1021166	0,093582
Exponencial	Cohesión	2,283977	0,29794

En la tabla 12 se evidencia que para el parámetro cohesión las distribuciones con mayor similitud son la distribución normal, log normal y gamma dado su valor error mínimo.

Posterior a la evaluación de verosimilitud y hallar los estadísticos de Crámer von mises y Kolmogórov-Smirnov, se procede a realizar los test de normalidad de dichas distribuciones, los valores P se muestran a continuación en la tabla 13.

Tabla 13. Valores p hallados a partir del test de Cramér-von Mises y test de Kolmogórov Smirnov

Distribuciones	Valores p (PUH)		Valores p (Cohesión)		Valores p (Ángulo °)	
	CVM	KS	CVM	KS	CVM	KS
Normal	0,1568	0,8717	0,1527	0,6107	0,1598	0,7524
Log normal	0,1436	0,4693	0,1505	0,4939	0,1552	0,7495
Exponencial	0,0002	0,0000	0,0171	0,0000	0,0018	0,0000
Gamma	0,1478	0,5899	0,1522	0,6102	0,1591	0,7328

De la tabla anterior se puede analizar que los datos poseen niveles de significancia mayores para las variables con valores P mayores para distribuciones normales, sin embargo, cabe aclarar que para algunos parámetros y de acuerdo con el tipo de test se tienen distribuciones que también podrían ser aplicables a distribuciones Log normal y Gamma.

6.4. Función de densidad y ajuste de la distribución de probabilidad acumulada

De los depósitos blandos tipo ceniza volcánica y rellenos presentes en la comuna Universitaria de la ciudad de Manizales se obtuvieron los diagramas de frecuencia y funciones de probabilidad acumulada de las propiedades mecánicas y físicas evaluadas, el proceso se realiza para dos de las distribuciones en las que los datos poseen mayor ajuste como los son la distribución normal y log normal.

Las distribuciones de probabilidad Normal y log Normal del parámetro geotécnico peso unitario húmedo se presentan en la (Figura 32) y fueron obtenidas a partir de los valores estadísticos calculados para la muestra de datos analizados.

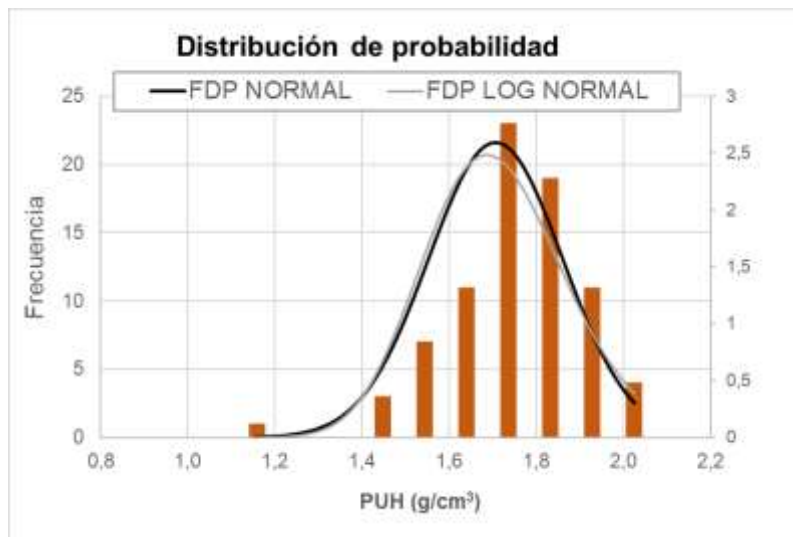


Figura 32. Función Normal y Log Normal ajustada al parámetro peso unitario húmedo

Adicionalmente la distribución de probabilidad acumulada para el parámetro peso unitario húmedo está representada en (Figura 33), en este se evidencian las curvas acumuladas para la función de probabilidad de la muestra y las funciones normal y Log normal a la que se ajustan dichos datos.

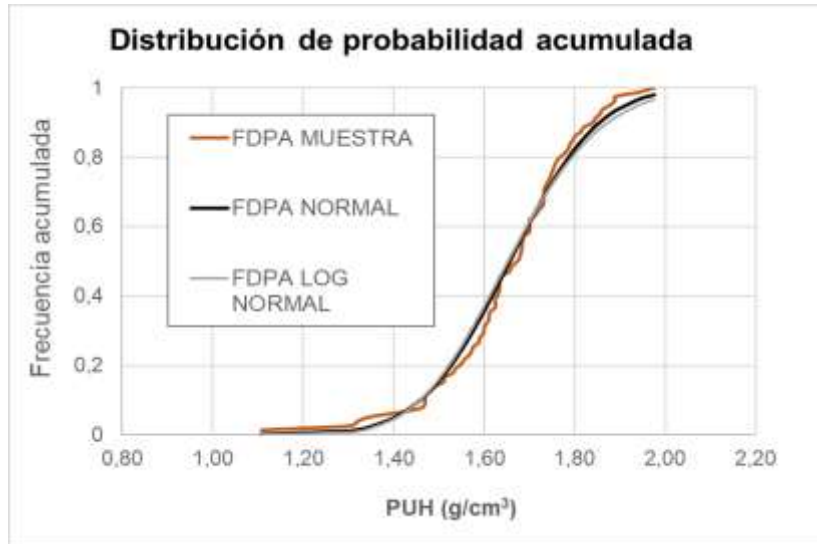


Figura 33. Función de probabilidad acumulada del peso unitarios y distribución normal y log normal

Las distribuciones de probabilidad Normal y log Normal del parámetro geotécnico cohesión se presentan en la (Figura 34) y fueron obtenidas a partir de los valores estadísticos calculados para la muestra de datos analizados.

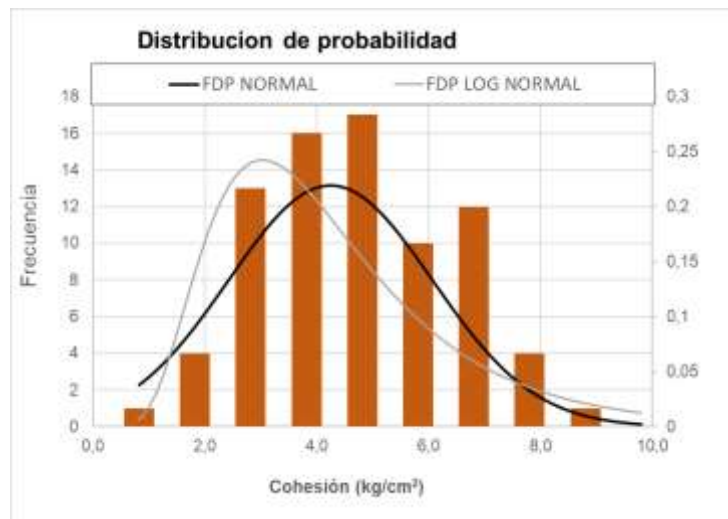


Figura 34. Función Normal y Log Normal ajustada al parámetro cohesión

Adicionalmente la distribución de probabilidad acumulada para el parámetro cohesión está representada en (Figura 35), en este se evidencian las curvas acumuladas para la función de probabilidad de la muestra y las funciones normal y Log normal a la que se ajustan dichos datos.

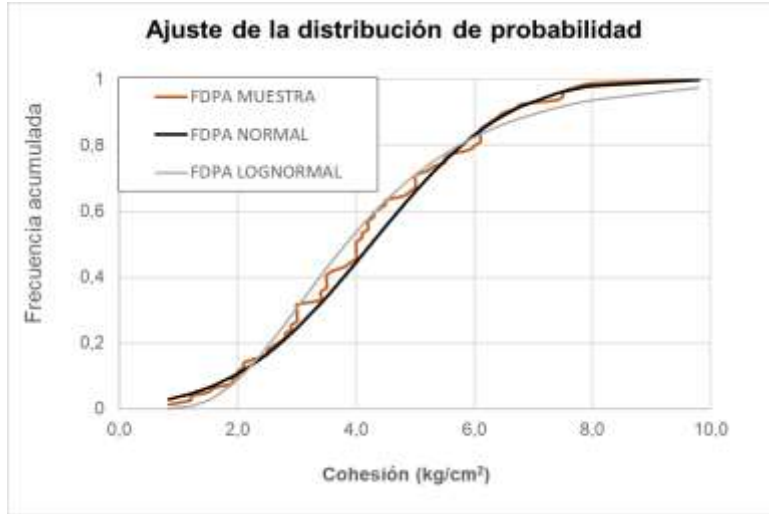


Figura 35. Función de probabilidad acumulada de la cohesión y distribución normal y log normal

Las distribuciones de probabilidad Normal y log Normal del parámetro geotécnico ángulo de fricción se presentan en la (Figura 36) y fueron obtenidas a partir de los valores estadísticos calculados para la muestra de datos analizados.

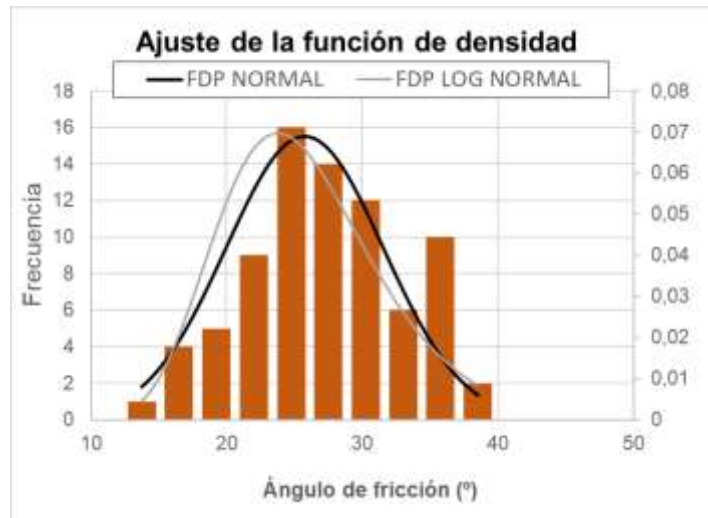


Figura 36. Función Normal y Log Normal ajustada al parámetro ángulo de fricción.

Adicionalmente la distribución de probabilidad acumulada para el parámetro ángulo de fricción está representada en (Figura 37), en este se evidencian las curvas acumuladas para la función de probabilidad de la muestra y las funciones normal y Log normal a la que se ajustan dichos datos.

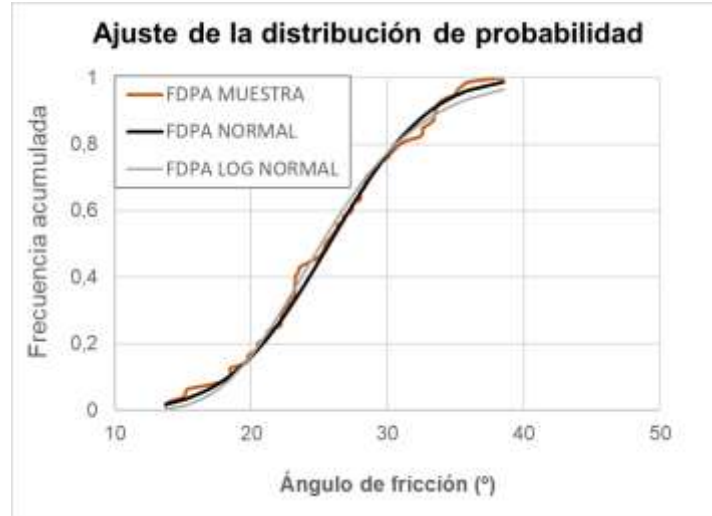


Figura 37. Función de probabilidad acumulada del ángulo de fricción y distribución normal y log normal.

6.5. Determinación de la probabilidad de falla mediante la simulación de Montecarlo

Con el fin de ingresar escenarios típicos a la evaluación del método probabilístico de Montecarlo, se usa la información de campo recopilada.

6.5.1. Altura del estrato blando

La prospección realizada en la comuna permitió identificar escenarios típicos para la evaluación probabilística. En cuanto a los valores de altura del estrato blando se evidenció que esta oscila entre los 1.2 y 9.0 m. Así se plantearon escenarios para el valor de z correspondiente a la altura del estrato blando, considerando variaciones del parámetro cada 50 cm. El análisis inicia con un valor correspondiente a 1 m hasta alcanzar la altura máxima del estrato blando, planteando para este parámetro 17 escenarios.

6.5.2. Altura del nivel de aguas freáticas

La determinación de la altura del nivel de agua presente en el espesor del estrato blando, consistió en generar tres escenarios típicos, el primero sin altura de la tabla de agua, el segundo contemplando altura de agua hasta la mitad del estrato blando y el tercero contemplando la altura de la tabla de agua igual al espesor del estrato, es decir con saturación del 100%.

Lo anterior se basa en la prospección geotécnica analizada en donde para algunos casos no se identifica la presencia de nivel de aguas freáticas por lo que se define el escenario del 0% de NAF en el espesor del estrato blando, también se evidencia en la prospección la variabilidad de alturas del NAF, por lo que se toma un valor medio del 50% de NAF en el espesor del estrato blando y finalmente basado en el concepto de frente húmedo descrito por (Rosanía., 2018) como característico de los suelos tropicales y siendo este un factor que domina el inicio de los movimientos en masa dado como resultado de la infiltración de lluvia en el suelo y el aumento de la tabla de agua del NAF y succión en los suelos, dado el anterior planteamiento se determina el escenario final y más crítico en donde se toma el 100% del NAF en el espesor del estrato blando.

6.5.3. Ángulos de inclinación característicos del sector

Para el parámetro β presente en la ecuación y el cual hace referencia a las pendientes características en el sector, se usaron los datos obtenidos por medio de modelos de elevación digital y mostrados en el presente documento en la (Figura 5), que permitió definir las pendientes típicas de la comuna, A partir del modelo se conocer que las inclinaciones representativas en el sector no superan los 45° es decir el 100% de pendiente, se establece que los escenarios para este parámetro oscilan en pendientes que van aumentando cada 5° hasta alcanzar la pendiente máxima de 45° , por lo que para esta característica se modelan 9 escenarios.

6.5.4. Coeficiente sísmico horizontal

Dado que según el título A de la norma sismo resistente colombiana 2010 (NSR-10) y su contenido en la tabla A.13.1, la obtención de los movimientos sísmicos de diseño está en función de:

- Amenaza sísmica, expresada según los parámetros A_a coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva para diseño y A_v coeficiente que representa la velocidad horizontal pico efectiva para diseño
- Características de la estratificación del suelo a través de los coeficientes sísmicos F_a y F_v .
- Coeficiente de importancia I

Se tiene que:

Para la obtención de los coeficientes sísmicos de diseño A_a y A_v nos remitimos al título A de la NSR-10, donde, dichos valores dependen de la zona de amenaza sísmica del departamento.

Tabla 14. Valores de A_a y A_v para Manizales (Tomado de Tabla A2.3-2 NSR-10)

Ciudad	A_a	A_v	Zona de Amenaza sísmica
Manizales	0.25	0.25	Alta

Por otro lado, la determinación de los coeficientes sísmicos (Tabla 15) está en función del tipo de suelo y los valores de A_a y A_v , por lo anterior la obtención de los coeficientes sísmicos F_a y F_v se muestran en las tablas A.2.4-3 y A.2.4-4 de la NSR-10 y dado que dentro de los suelos blandos, (Aristizábal, 2017) define que para suelos blandos como las cenizas volcánicas los tipos de suelo corresponden en algunos casos al tipo E, se usará este tipo de suelo con el fin de usar parámetros conservadores en el cálculo de estos factores.

Tabla 15. Valores de Fa y Fv (Tomado de, Tablas 2.4-3 y 2.4.4 de NSR-10)

Tipo de Perfil	Aa=0.20	Aa=0.30
E	1.7	1.2

Teniendo en cuenta la tabla anterior e interpolando se tomará entonces un Fa de 1.45.

adicionalmente se toma un coeficiente de importancia (I) de 1, tomado de la tabla A.2.5-1 de la NSR-10, tomando para las edificaciones cercanas a los taludes de la comuna Universitaria de manera general como de ocupación normal.

definido el espectro de diseño y teniendo en cuenta Valores de Kst mínimos para análisis pseudoestaticos de taludes definidos en el título H de la norma sismo resistente NSR-10, dependiendo del tipo de material térreo (reforzado o no) y del tipo de análisis. Tabla H.5.2-1, se toma Kst de 0.80.

Definidos los valores de Aa, Fa, I y kst, se determina que el valor de Kh será:

$$\text{Ecuación 28. } Kh = Aa * Fa * I * Kst \text{ en donde } Kh = 0.25 * 1.45 * 1 * 0.80 = 0.29$$

En cuanto al valor de Kv se toma 2/3 de Kh en este caso 0.19 según como lo menciona la NSR-10 en su capítulo A.2.8: “componente vertical de los movimientos sísmicos, en su sección A.2.8.1 – Cuando se utilice la componente vertical de los movimientos sísmicos de diseño, como mínimo debe tomarse como las dos terceras partes de los valores correspondientes a los efectos horizontales”.

Los criterios para determinación del nivel de amenaza de acuerdo con los valores obtenidos para factor de seguridad y probabilidad de falla (Tabla 16, Tabla 17) se realizan de acuerdo a lo descrito en el capítulo 4.6.19 del presente documento, se usarán los siguientes colores para su clasificación:

Tabla 16. Clasificación de la amenaza de un talud ante un deslizamiento en función del FS y la probabilidad de falla







Nivel de amenaza	Factor de seguridad	Probabilidad de falla	Color
Alta	<1.1	>0.16	
Media	1.1-1.5	0,001-0,16	
Baja	>1.5	<0,001	

Tabla 17. Criterio para la clasificación de la amenaza en función de la probabilidad de falla.

Nivel de amenaza	Probabilidad anual de falla	Color
Baja	<0,001	
Media	0,001-0,16	
Alta	>0,16	

6.5.5. Método Montecarlo taludes nivel de aguas freáticas 0%, alturas estrato blando 1.0 a 9.0 m

Con el fin de realizar la modelación de Montecarlo se usan los parámetros de entrada para el primer escenario contemplando la altura del agua (hw) como el 0% del espesor blando, para la altura de estrato blando se toman (z) de 1-9 m de espesor, adicionalmente para las variables cohesión (c), ángulo de fricción (ϕ) y peso unitario húmedo (γ) se usan los valores medios hallados en el tratamiento estadístico y sus desviaciones estándar, finalmente para el coeficiente sísmico horizontal (kh) se toma un valor de 0.29 obtenido según la Norma sismo resistente definido de acuerdo con la zona de amenaza sísmica para la ciudad. El valor de cada uno de estos datos de entrada se analiza a partir del método del talud infinito presentado en la ecuación del presente documento; (Ecuación 10) para el cálculo del factor de seguridad. Por otra parte para el cálculo de la probabilidad de falla se usan dos métodos, el primero corresponde a la obtención de la porción bajo la curva unitaria de la distribución de frecuencia, correspondiente a los valores del factor de seguridad por debajo de 1,0 y el segundo al número de iteraciones con FS menor que 1.0 en relación con el total del número de iteraciones realizadas (Anexo 10.8), de este resultado se tomará para la tabla de resultados de probabilidad de falla, el valor más conservador.

Los parámetros de entrada del método para este escenario se relacionan en la (tabla 18).

Tabla 18. Parámetros de entrada método Montecarlo

z	1,00-9,00	m		
hw	0%*z	m		
Kh	0,29			
C	4,25	Media	1,82	Desv. Est.
ϕ	25,75	Media	5,79	Desv. Est.
γ	1,66	Media	0,15	Desv. Est.

Los valores de F.S medio para cada uno de los espesores de masa deslizante y ángulo de inclinación se presentan en la (Tabla 19) a partir de las 5000 iteraciones realizadas y contemplando una altura del nivel de agua del 0% de la altura del estrato blando, basado en la clasificación de los factores de seguridad medios descritos en el capítulo 4.6.19 del presente documento, se presentan los rangos definidos para nivel de amenaza según el factor de seguridad; Nivel de amenaza alto para factores de seguridad menores a 1.1 y representados con color rojo, nivel de amenaza medio para factores de seguridad que van desde 1.1 hasta 1.5 y señalados en color naranja, por último nivel de amenaza bajo para factores de seguridad con valores mayores a 1.5 y marcados en color verde. Los resultados indican que para los taludes de la comuna Universitaria sin presencia del nivel freático y ángulos de inclinación bajos entre 5° y 10° se presentan niveles de amenaza bajos para todos los escenarios analizados incluyendo espesores de hasta 9.0 m, sin embargo, esta condición cambia a medida que se aumenta el ángulo de inclinación, en la tabla se puede evidenciar por ejemplo que para ángulos de hasta 45° y espesor de mínimo 5.50m el nivel de amenaza es medio, finalmente se presenta una proporción de niveles de amenaza altos para ángulos de inclinación desde 30° si se tienen espesores desde los 8.0 m.

Tabla 19. Nivel de amenaza en función del factor de seguridad medio, en los taludes de la comuna Universitaria espesor masa deslizante vs ángulo de inclinación NAF 0%.

		Nivel de amenaza según factor de seguridad medio																	
		Espesor masa deslizante (m)																	
ángulo (°)	β	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	
	5°	8,20	5,89	4,73	4,03	3,57	3,24	2,99	2,80	2,65	2,52	2,41	2,33	2,25	2,18	2,13	2,07	2,03	
	10°	6,74	4,82	3,87	3,29	2,91	2,63	2,43	2,27	2,14	2,04	1,95	1,88	1,81	1,76	1,71	1,67	1,63	
	15°	5,80	4,14	3,30	2,80	2,47	2,23	2,05	1,92	1,80	1,71	1,64	1,57	1,52	1,47	1,43	1,39	1,36	
	20°	5,17	3,67	2,92	2,47	2,17	1,95	1,79	1,67	1,57	1,48	1,42	1,36	1,31	1,27	1,23	1,20	1,17	
	25°	4,74	3,35	2,65	2,23	1,95	1,75	1,60	1,49	1,39	1,32	1,25	1,20	1,15	1,11	1,08	1,05	1,02	
	30°	4,47	3,13	2,47	2,07	1,80	1,61	1,47	1,36	1,27	1,19	1,13	1,08	1,04	1,00	0,97	0,94	0,91	
	35°	4,31	3,00	2,35	1,96	1,70	1,51	1,37	1,26	1,17	1,10	1,04	0,99	0,95	0,91	0,88	0,85	0,83	
	40°	4,25	2,94	2,29	1,90	1,63	1,45	1,31	1,20	1,11	1,04	0,98	0,93	0,89	0,85	0,82	0,79	0,76	
	45°	4,30	2,96	2,28	1,88	1,61	1,42	1,28	1,16	1,07	1,00	0,94	0,89	0,84	0,81	0,77	0,74	0,72	

En lo que tiene que ver con el concepto de probabilidad de falla, cuando no se presenta altura de la tabla de agua, los valores arrojados en el método de Montecarlo se encuentran discriminados en la (Tabla 20) y clasificados a partir de lo definido en el presente documento en el capítulo 4.6.19, en este se definen los niveles de amenaza en función de las probabilidades de falla, de acuerdo con esta clasificación se categorizan como niveles de amenaza bajas para probabilidades menores a 0.001 señaladas en color verde, para el análisis de la comuna Universitaria, corresponden solo a los casos en los que se tienen ángulos de inclinación de 5° y espesores máximos de 6.5 metros, por otro lado para la clasificación de amenaza media, las probabilidades de falla medias varían entre 0.001 y 0.16, para el presente estudio se categorizan como niveles de amenaza media, cuando se tienen ángulos de inclinación desde 5° hasta 40° sin embargo a medida que el espesor aumenta el ángulo de inclinación aceptable disminuye, finalmente se definen como niveles de amenaza alta en función de la probabilidad de falla alta, en los casos que se presentan probabilidades mayores al 16%, para este análisis se tienen probabilidades de falla alta para ángulos de inclinación desde los 20° hasta los 45° y espesores desde 3.0m a 9.0m, dependiendo su combinación.

Tabla 20. Resultados niveles de amenaza en función de la probabilidad de falla para la Comuna Universitaria
espesor masa deslizando vs ángulo de inclinación masa deslizando NAF 0%.

		Probabilidad de falla																
		Espesor masa deslizando (m)																
		1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0
ángulo (°)	5°	0,80%	0,74%	0,71%	0,68%	0,67%	0,68%	0,69%	0,71%	0,74%	0,79%	0,84%	0,89%	0,96%	1,0%	1,1%	1,2%	1,3%
	10°	1,0%	1,1%	1,1%	1,2%	1,3%	1,4%	1,6%	1,8%	2,0%	2,2%	2,5%	2,7%	3,1%	3,4%	3,8%	4,2%	4,6%
	15°	1,3%	1,5%	1,7%	2,0%	2,4%	2,8%	3,3%	3,9%	4,5%	5,3%	6,1%	7,0%	8,0%	9,1%	10,2%	11,4%	12,7%
	20°	1,6%	2,0%	2,5%	3,2%	4,0%	4,9%	6,1%	7,4%	9,0%	10,7%	12,6%	14,8%	17,0%	19,4%	21,9%	24,5%	27,2%
	25°	1,9%	2,6%	3,5%	4,6%	6,1%	7,9%	10,0%	12,5%	15,4%	18,6%	22,2%	26,0%	30,0%	34,1%	38,2%	42,4%	46,5%
	30°	2,2%	3,2%	4,5%	6,3%	8,6%	11,4%	14,8%	18,7%	23,2%	28,2%	33,4%	39,0%	44,5%	50,1%	55,5%	60,6%	65,4%
	35°	2,4%	3,7%	5,5%	7,9%	11,1%	15,0%	19,6%	25,1%	31,1%	37,6%	44,3%	51,1%	57,7%	64,0%	69,8%	75,0%	79,5%
	40°	2,7%	4,2%	6,4%	9,4%	13,2%	18,1%	23,8%	30,4%	37,7%	45,3%	53,0%	60,5%	67,5%	73,8%	79,4%	84,0%	87,9%
	45°	2,8%	4,5%	6,9%	10,3%	14,7%	20,1%	26,6%	34,0%	42,0%	50,3%	58,4%	66,2%	73,3%	79,4%	84,6%	88,8%	92,0%

Con el fin de representar gráficamente los resultados obtenidos, en la (Figura 38) se expresan los factores de seguridad probable en función del espesor de estrato blando. Adicionalmente en la gráfica se marca una línea roja que representa el factor de seguridad mínimo aceptable. En el análisis de los datos para la comuna universitaria se evidencia por ejemplo que para espesores de masa deslizante mayores a 6m, el factor de seguridad se encuentra por debajo del mínimo aceptable.

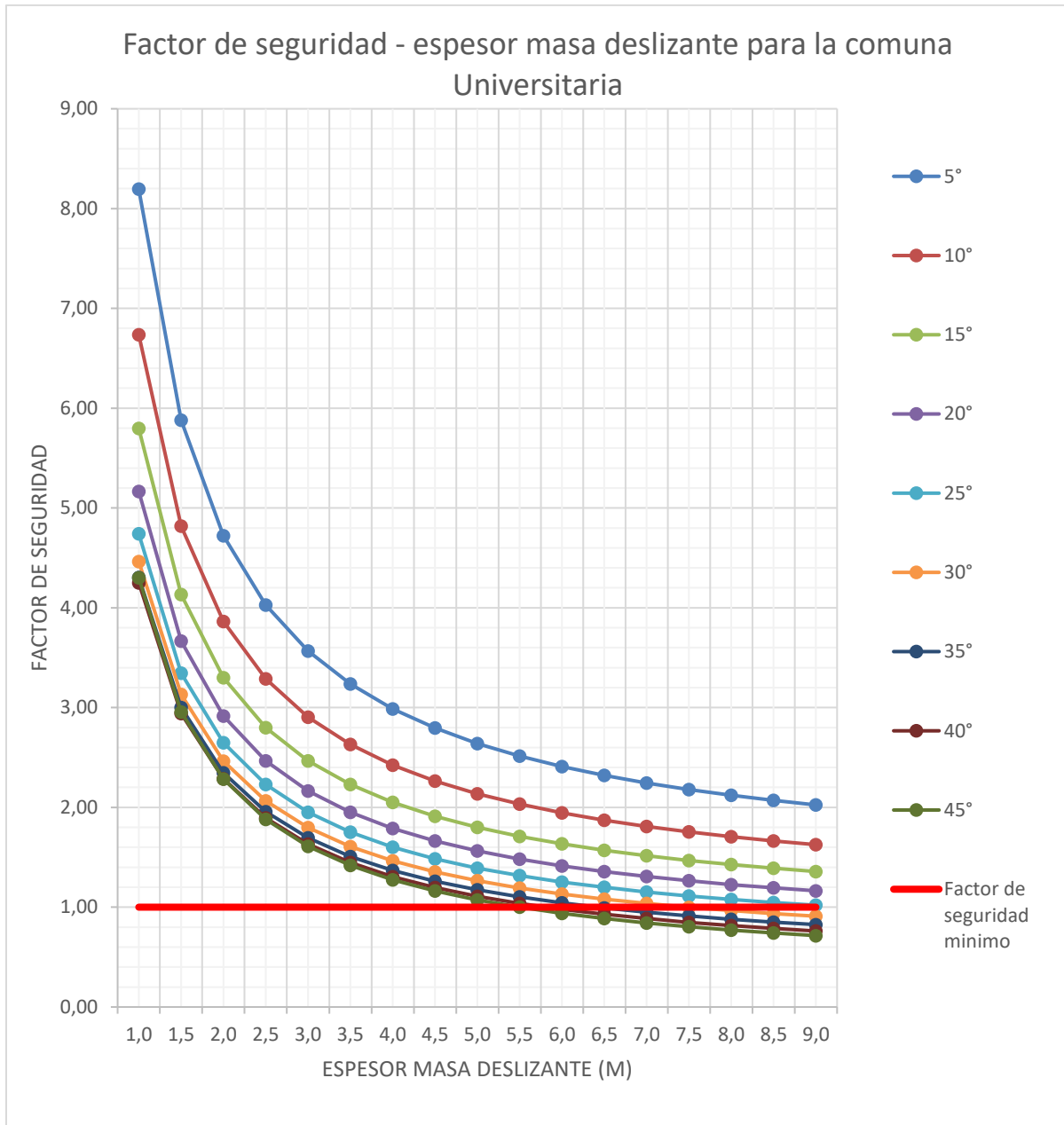


Figura 38. Gráficas FS medio - espesor de la masa deslizante para la comuna Universitaria NAF 0%

Para el caso de las gráficas generadas a partir de los resultados obtenidos de factor de seguridad en función del ángulo de inclinación del talud para la comuna universitaria se agrupan y describen en la (Figura 39), esta gráfica permite interpretar que a partir de ángulos de inclinación desde los 30° se presentan factores de seguridad por debajo de los mínimos aceptables, para los casos en los que se tienen espesores del estrato blando representativos.

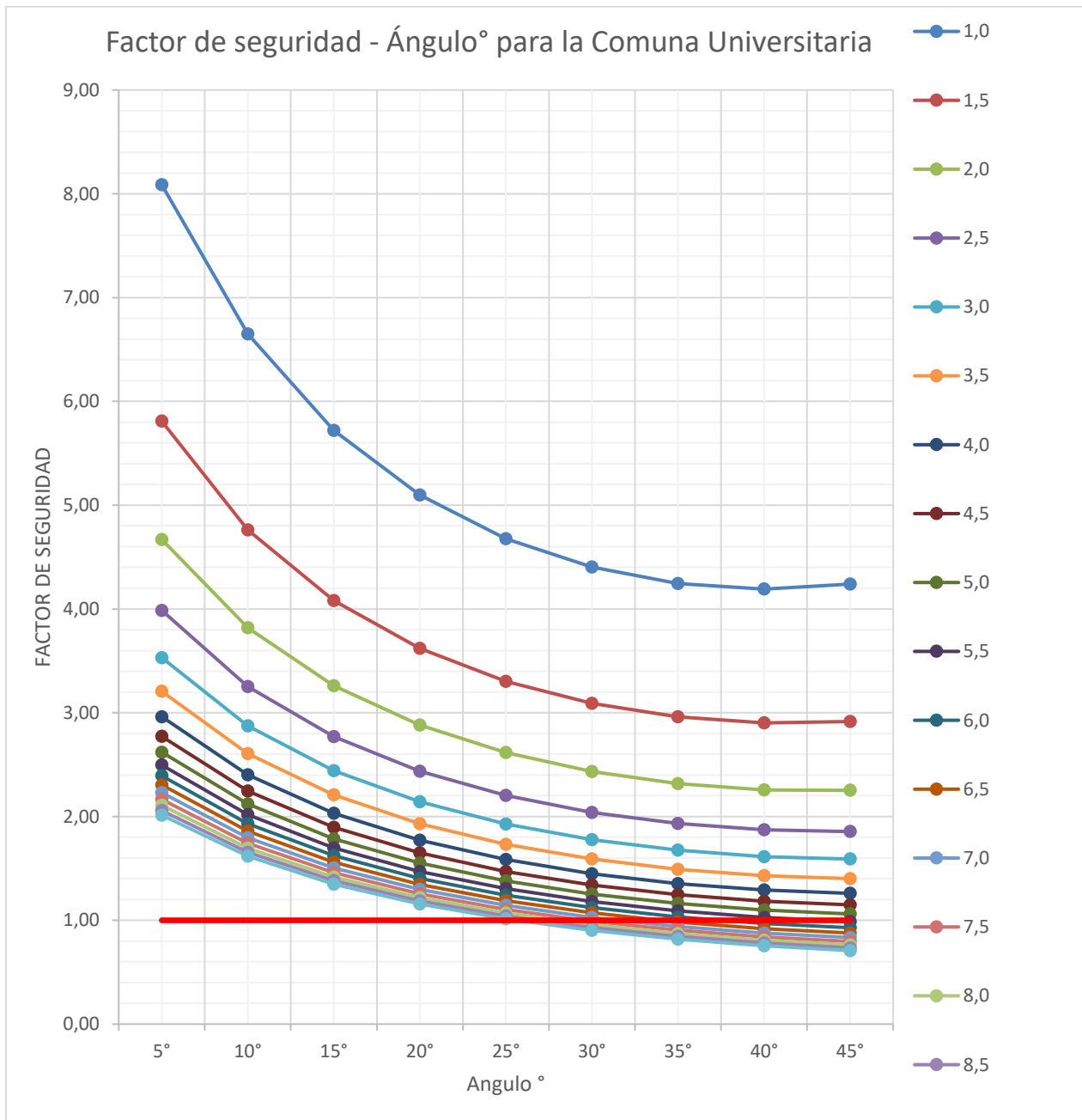


Figura 39. Factor de seguridad- ángulo de inclinación del talud comuna Universitaria NAF 0%

En lo que tiene que ver con el cálculo de la probabilidad de falla vs espesor de la masa deslizante se presenta la (Figura 40) por medio de este se pueden encontrar los porcentajes de probabilidad de falla en función del espesor del estrato blando para la comuna Universitaria, Específicamente para espesores del estrato blando mayores o iguales a 3.0 m se podrá encontrar probabilidades de falla altas a medida que aumenta exponencialmente el ángulo de inclinación del estrato.

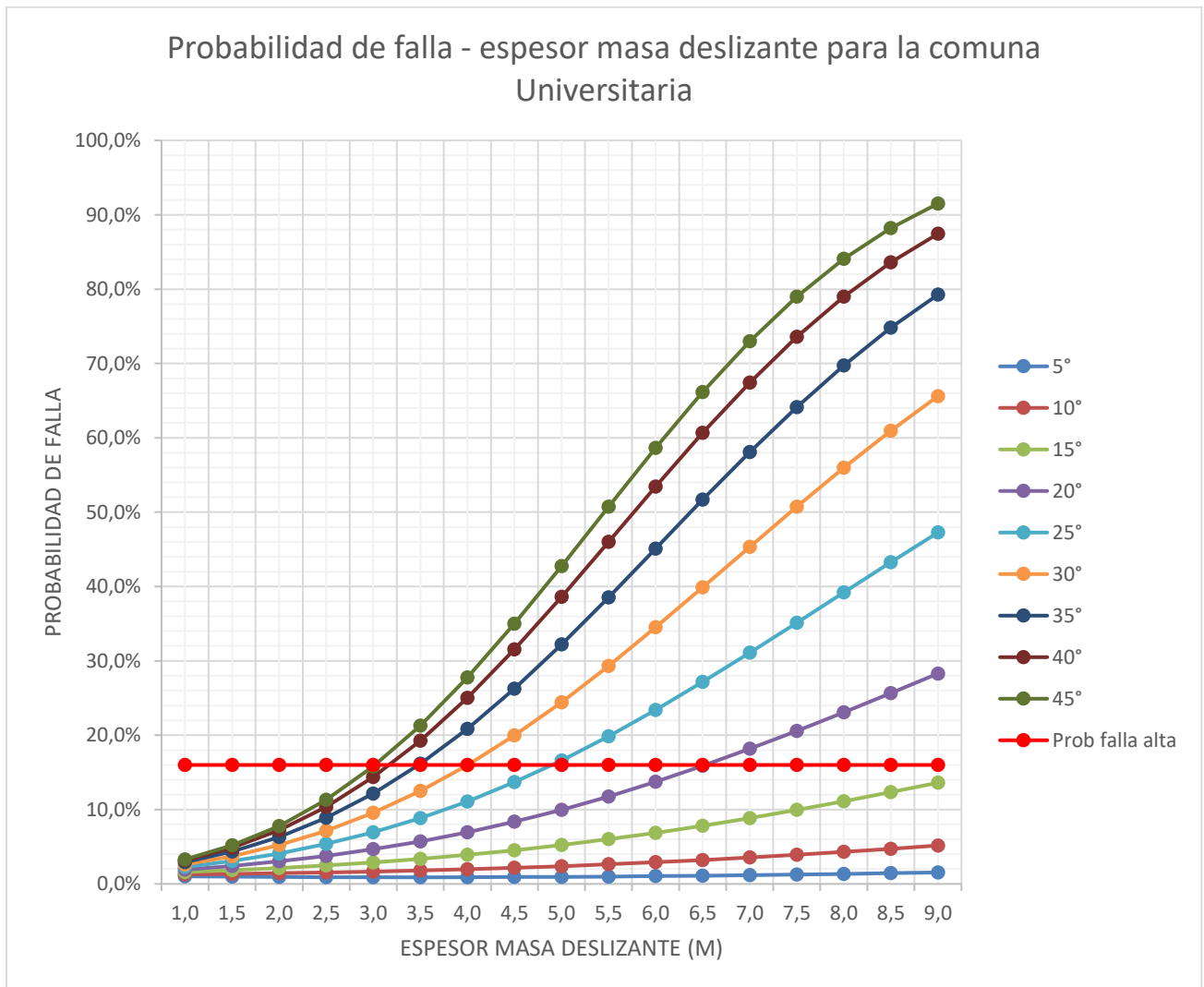


Figura 40. Probabilidad de falla – Espesor masa deslizante, Comuna Universitaria NAF 0%

En lo que tiene que ver con el cálculo de la probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud se presenta la (Figura 41) por medio de este análisis se genera una gráfica en la que se expresan los porcentajes de probabilidad de falla en función del ángulo de inclinación del estrato blando. Para el caso se podrán presentar probabilidades altas de falla a medida a partir de los 20° y a medida que se presentan aumentos en los ángulos de inclinación de los taludes ya que favorecen fallas planares.

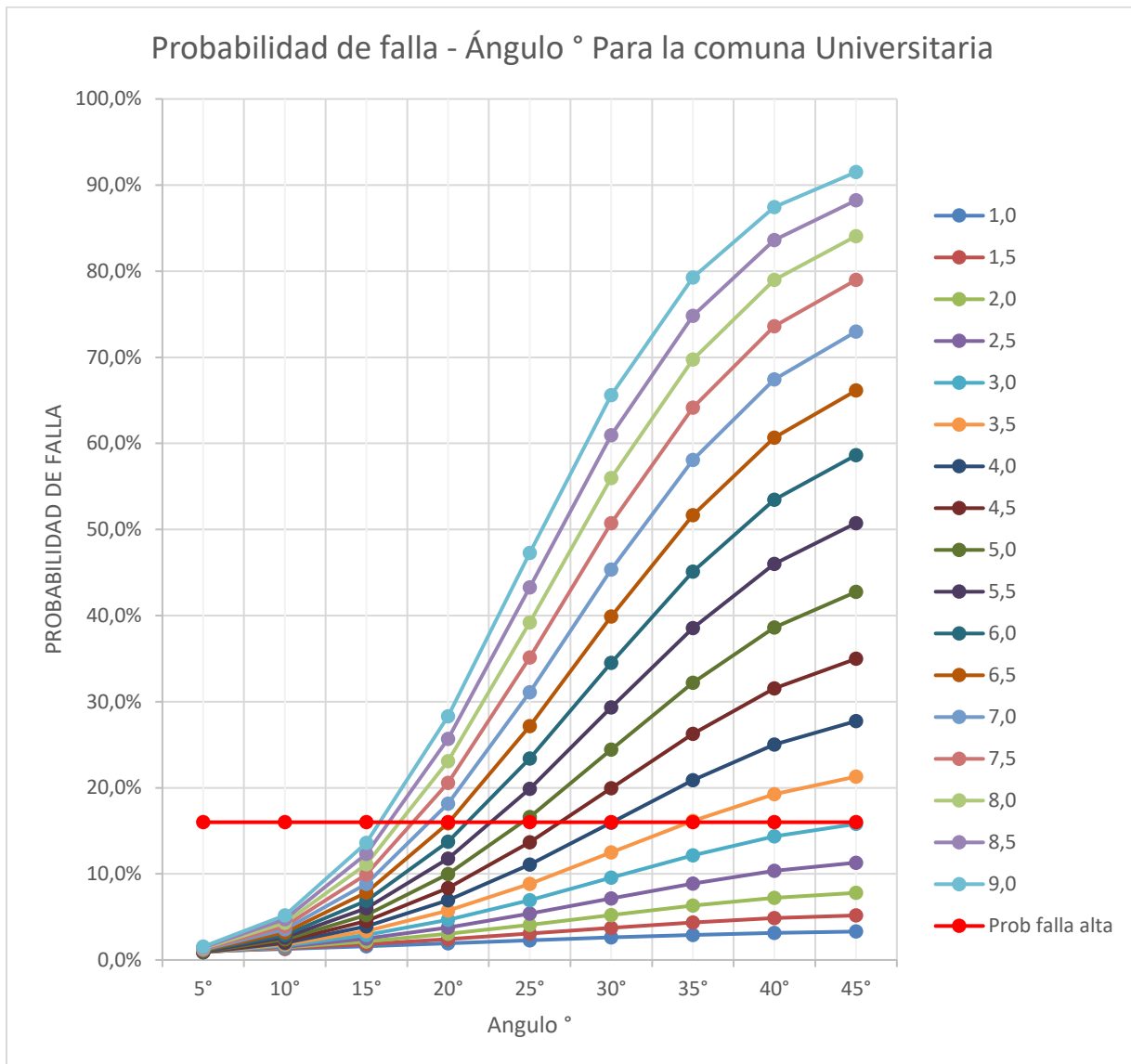


Figura 41. Probabilidad de falla – Ángulo de inclinación la comuna Universitaria NAF 0%.

**6.5.6. Método Montecarlo taludes nivel de aguas freáticas 50%, altura de estrato blando
1.0 a 9.0 m**

Con el fin de realizar la modelación de Montecarlo se usan los parámetros de entrada para el segundo escenario contemplando la altura del agua (hw) como el 50% del espesor blando, para la altura de estrato blando se toman (z) de 1-9 m de espesor, adicionalmente para las variables cohesión (c), ángulo de fricción (ϕ) y peso unitario húmedo (γ) se usan los valores medios hallados en el tratamiento estadístico y sus desviaciones estándar y finalmente para el coeficiente sísmico horizontal (kh) se toma un valor de 0.29 obtenido según la Norma sismo resistente definido de acuerdo con la zona de amenaza sísmica para la ciudad. El valor de cada uno de estos datos de entrada se analiza a partir del método del talud infinito presentado en la ecuación del siguiente documento; (Ecuación 10) para el cálculo del factor de seguridad y (Ecuación 11) para el cálculo de la probabilidad de falla. Por otra parte para el cálculo de la probabilidad de falla se usan dos métodos, el primero corresponde a la obtención de la porción bajo la curva unitaria de la distribución de frecuencia, correspondiente a los valores del factor de seguridad por debajo de 1,0 y el segundo al número de iteraciones con FS menor que 1.0 en relación con el total del número de iteraciones realizadas (Anexo 10.9), de este resultado se tomará para la tabla de resultados de probabilidad de falla, el valor más conservador.

Los parámetros de entrada del método para este escenario se relacionan en la (tabla 21).

Tabla 21. Parámetros de entrada método Montecarlo

z	1,00-9.00	m		
hw	50%*z	m	Z min0.50m	Z máx. 4.50m
Kh	0,29			
C	4,25	Media	1,82	Desv. Est.
ϕ	25,75	Media	5,79	Desv. Est.
γ	1,66	Media	0,15	Desv. Est.

Los valores de F.S medio para cada uno de los espesores de masa deslizante y ángulo de inclinación se presentan en la (Tabla 22) a partir de las 5000 iteraciones realizadas y contemplando una altura del nivel de agua del 50% del espesor del estrato blando, basado en la clasificación de los factores de seguridad medios descritos en el capítulo 4.6.19 del presente documento, se presentan los rangos definidos para para el nivel de amenaza según el factor de seguridad; Nivel de amenaza alto para factores de seguridad menores a 1.1 y representados con color rojo, nivel de amenaza medio para factores de seguridad que van desde 1.1 hasta 1.5 y señalados en color naranja, por último nivel de amenaza bajo para factores de seguridad mayores a 1.5 y marcados en color verde. Los resultados indican que para taludes de la comuna Universitaria con presencia de nivel freático al nivel medio del estrato y ángulos de inclinación de 5° se presentan niveles de amenaza bajos para todos los escenarios analizados, mientras que para ángulos de inclinación mayores a 10° los niveles de amenaza son medios cuando se tienen espesores desde los 7.0 m, en la tabla se evidencia por ejemplo que para ángulos de inclinación desde los 20° y espesores de estrato blando desde 8.0 metros los niveles de amenaza son altos.

Tabla 22. Nivel de amenaza en función del factor de seguridad medio en los taludes de la comuna Universitaria, NAF 50%

Espesor masa deslizante vs ángulo de inclinación

		Niveles de amenaza en función del factor de seguridad medio																
		Espesor masa deslizante (m)																
		1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0
α (grados)	5°	7,70	5,42	4,28	3,60	3,14	2,82	2,57	2,38	2,23	2,11	2,00	1,92	1,84	1,78	1,72	1,67	1,62
	10°	6,34	4,45	3,50	2,94	2,56	2,29	2,09	1,93	1,81	1,70	1,62	1,54	1,48	1,43	1,38	1,34	1,30
	15°	5,46	3,82	3,00	2,51	2,18	1,94	1,77	1,63	1,52	1,43	1,36	1,30	1,24	1,20	1,15	1,12	1,09
	20°	4,87	3,40	2,66	2,21	1,92	1,71	1,55	1,42	1,33	1,25	1,18	1,12	1,07	1,03	0,99	0,96	0,93
	25°	4,48	3,11	2,42	2,01	1,73	1,54	1,39	1,28	1,19	1,11	1,05	0,99	0,95	0,91	0,88	0,85	0,82
	30°	4,23	2,92	2,26	1,87	1,61	1,42	1,28	1,17	1,08	1,01	0,95	0,90	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73
	35°	4,10	2,81	2,17	1,78	1,53	1,34	1,21	1,10	1,01	0,94	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72	0,70	0,67
	40°	4,06	2,77	2,13	1,74	1,48	1,30	1,16	1,05	0,97	0,90	0,84	0,79	0,75	0,71	0,68	0,65	0,62
	45°	4,13	2,80	2,14	1,74	1,48	1,29	1,15	1,04	0,95	0,87	0,81	0,76	0,72	0,68	0,65	0,62	0,59

En lo que tiene que ver con el concepto de probabilidad de falla, cuando se presenta altura de la tabla de agua del 50% de la altura del estrato, los valores arrojados en el método de Montecarlo se encuentran discriminados en la (Tabla 23) y clasificados a partir de lo definido en el presente documento en el capítulo 4.6.19, en este se definen los rangos de clasificación del nivel de amenaza en función de las probabilidades de falla, de acuerdo con esta clasificación se categorizan como niveles de amenaza bajas para probabilidades menores a 0.001 señaladas en color verde, para este análisis se evidencia que en ningún escenario se presentan probabilidades de falla bajas, Por otro lado los niveles de amenaza media se definen como aquellas que varían entre 0.001 y 0.16, para el presente estudio se evidencian cuando se tienen ángulos desde 5° hasta 45° y espesores que van desde 1.0 a 9.0 m de altura, finalmente se definen como probabilidad de falla alta aquellas en las que se presentan probabilidades mayores a 0.16, para este análisis se tienen niveles de amenaza alta con ángulos desde los 10° hasta los 45° y espesores que van desde 3.0m hasta 9.0m.

Tabla 23. Resumen resultados probabilidad de falla, espesor masa deslizante vs ángulo de inclinación NAF 50%.

	Probabilidad de falla																
	Espesor masa deslizante (m)																
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0
5°	1,4%	1,5%	1,6%	1,7%	1,9%	2,1%	2,3%	2,5%	2,7%	3,0%	3,3%	3,7%	4,1%	4,5%	4,9%	5,4%	5,9%
10°	1,7%	2,0%	2,4%	2,8%	3,3%	3,9%	4,6%	5,4%	6,3%	7,4%	8,5%	9,7%	11,1%	12,6%	14,2%	15,8%	17,6%
15°	2,1%	2,7%	3,4%	4,4%	5,5%	6,9%	8,5%	10,4%	12,5%	14,9%	17,6%	20,5%	23,7%	27,0%	30,5%	34,1%	37,8%
20°	2,4%	3,4%	4,7%	6,3%	8,3%	10,8%	13,8%	17,2%	21,1%	25,5%	30,2%	35,2%	40,4%	45,7%	50,9%	56,1%	61,0%
25°	2,8%	4,2%	6,1%	8,5%	11,6%	15,4%	20,0%	25,2%	31,1%	37,4%	44,0%	50,7%	57,3%	63,6%	69,4%	74,7%	79,4%
30°	3,2%	5,0%	7,4%	10,7%	14,9%	20,1%	26,2%	33,2%	40,7%	48,5%	56,3%	63,8%	70,7%	76,9%	82,2%	86,6%	90,1%
35°	3,5%	5,6%	8,6%	12,6%	17,8%	24,2%	31,6%	39,9%	48,5%	57,2%	65,5%	73,0%	79,6%	85,1%	89,4%	92,8%	95,2%
40°	3,7%	6,0%	9,4%	14,0%	19,9%	27,1%	35,4%	44,4%	53,7%	62,8%	71,1%	78,5%	84,6%	89,4%	93,0%	95,5%	97,3%
45°	3,8%	6,2%	9,8%	14,6%	20,8%	28,4%	37,0%	46,4%	55,9%	65,1%	73,5%	80,7%	86,5%	91,0%	94,3%	96,5%	98,0%

Con el fin de representar gráficamente los resultados obtenidos, en la (Figura 42) se expresan los factores de seguridad en función del espesor de estrato blando. Adicionalmente en la gráfica se marca una línea roja que representa el factor de seguridad mínimo aceptable. En el análisis de los datos para la comuna universitaria bajo estas condiciones se evidencia que en los casos que se presenten espesores de masa deslizante mayores a 5 m, el factor de seguridad se encuentra por debajo del mínimo aceptable en estos casos.

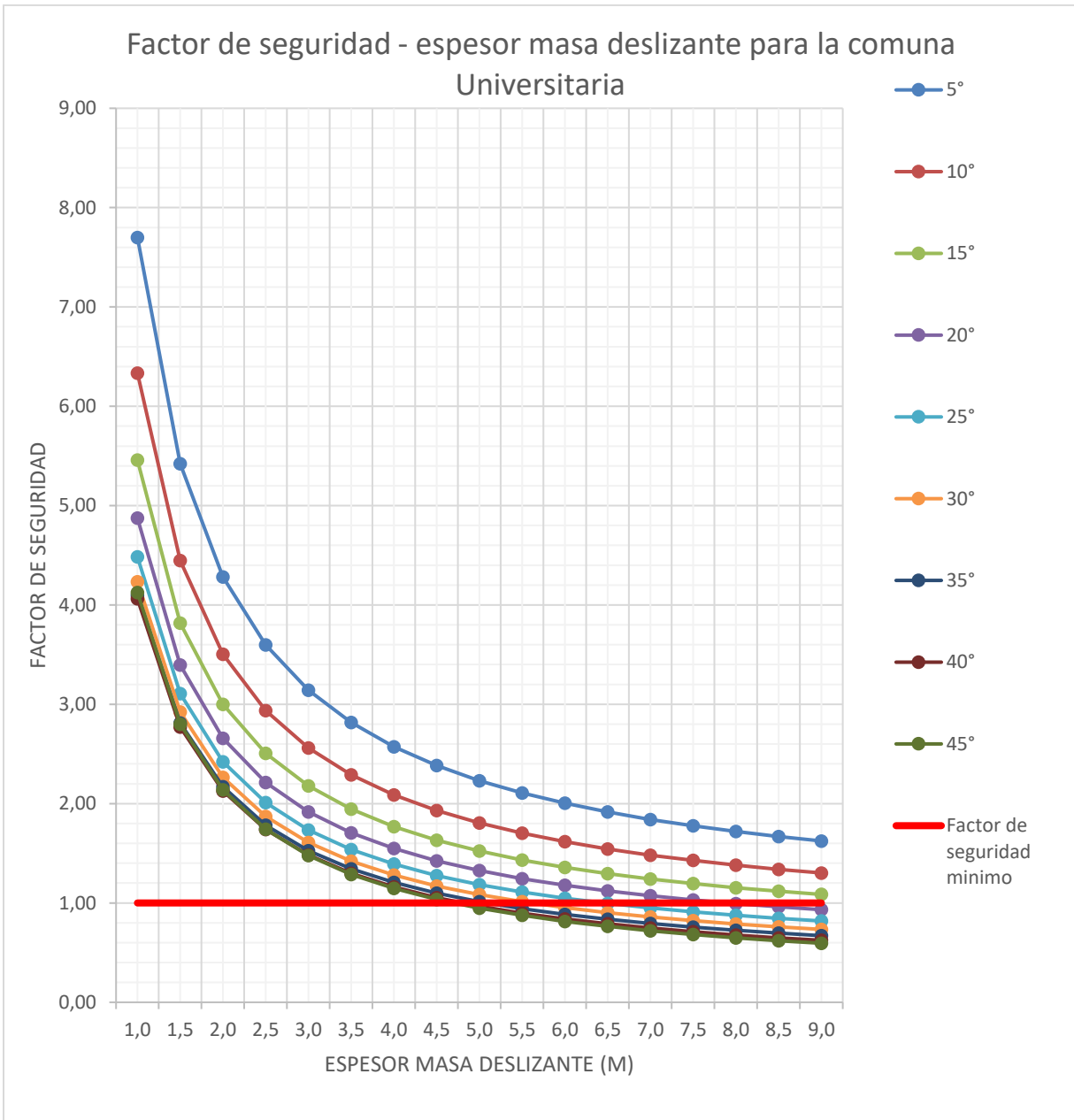


Figura 42. Gráficas FS medio - espesor de la masa deslizante comuna Universitaria NAF 50%.

Para el caso de gráficas generadas a partir de los resultados obtenidos de factor de seguridad vs ángulo de inclinación del talud para la comuna Universitaria se agrupan y describen en la (Figura 43), esta gráfica permite interpretar que a partir de ángulos de inclinación de 20° se presentan factores de seguridad por debajo de los mínimos aceptables, para los casos que se tienen espesores del estrato representativos.

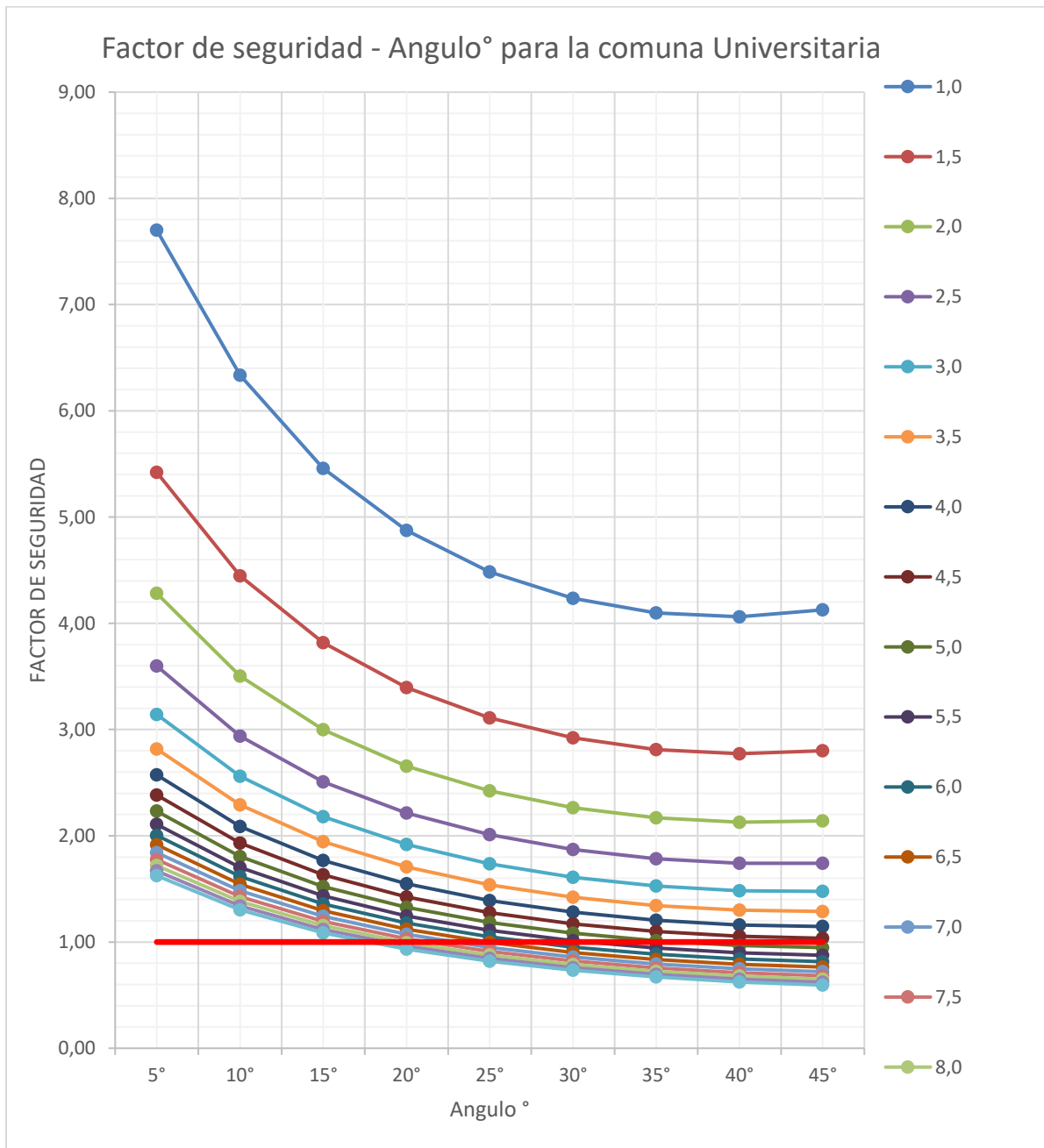


Figura 43. Factor de seguridad - ángulo de inclinación del talud, NAF 50%

En lo que tiene que ver con el cálculo de la probabilidad de falla vs espesor de la masa deslizante se presenta la (Figura 44) en esta se encuentran los valores de probabilidad de falla en función del espesor del estrato blando para la comuna Universitaria, dicho estrato corresponde al estrato potencialmente deslizante, Específicamente para espesores mayores o iguales a 3.0 m se podrán encontrar probabilidades de falla altas a medida que aumentan los ángulos de inclinación del estrato.

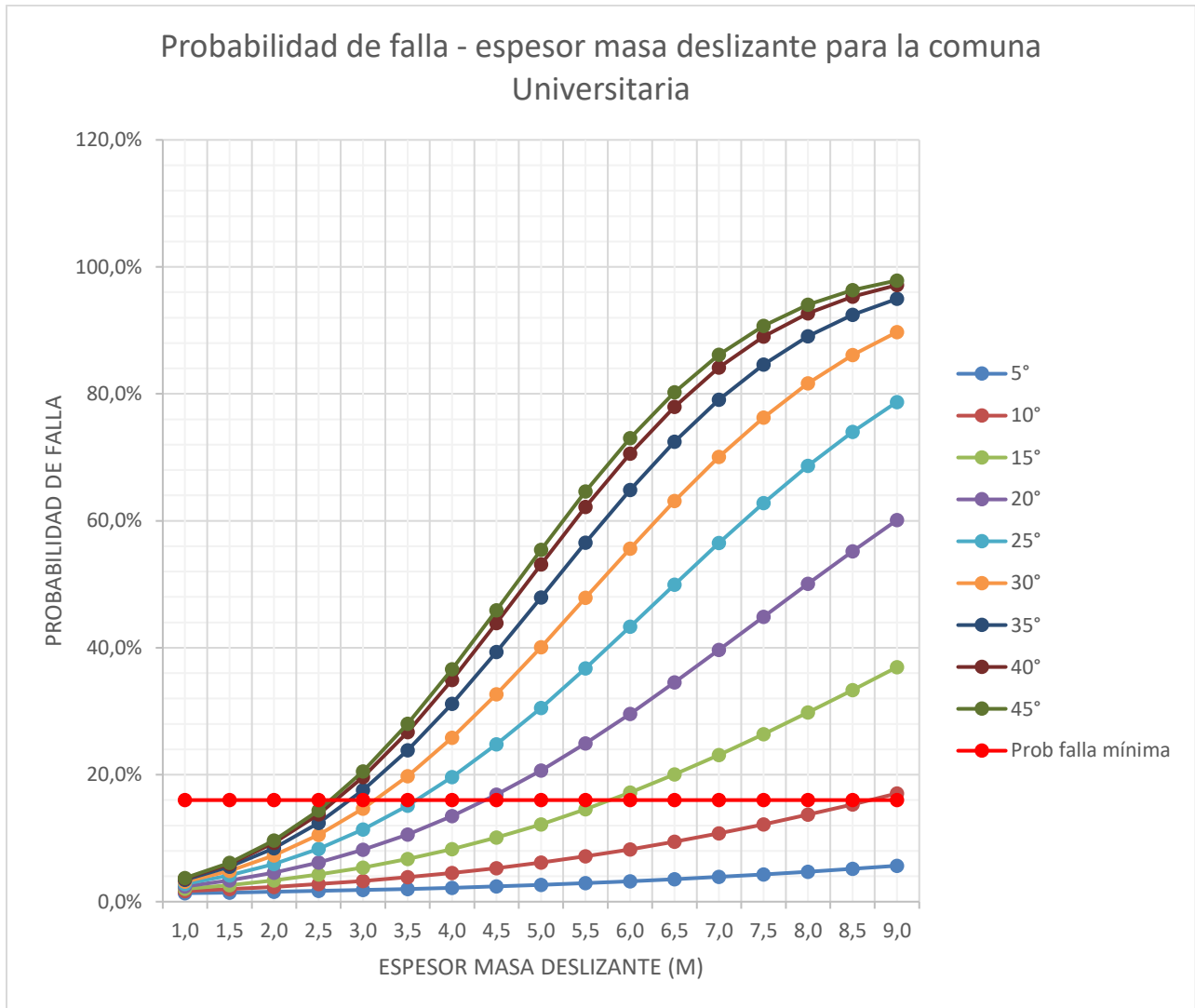


Figura 44. Probabilidad de falla – Espesor de la masa deslizante, comuna Universitaria NAF 50%.

En lo que tiene que ver con el cálculo de la probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud se presenta la (Figura 45) por medio de este análisis se genera una gráfica en la que se expresan los porcentajes de probabilidad de falla en función del ángulo de inclinación de los taludes de la comuna Universitaria, para el caso se podrán presentar probabilidades falla altas a partir de los 10° y a medida que se presentan aumentos en los ángulos de inclinación de los taludes ya que favorecen los movimientos planares.

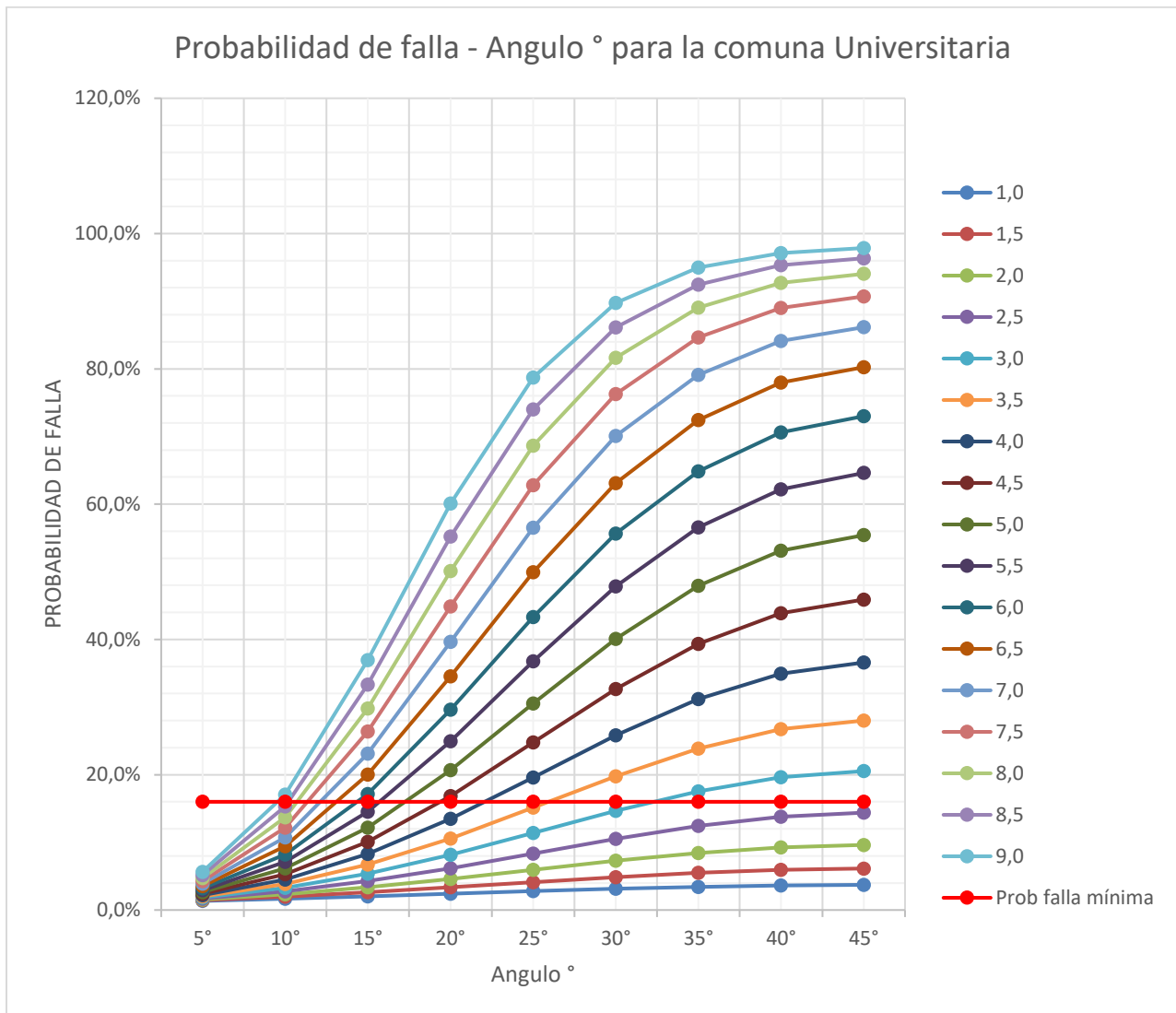


Figura 45. Probabilidad de falla – Ángulo de inclinación para la comuna Universitaria, NAF 50%.

6.5.7. Método Montecarlo taludes nivel de aguas freáticas 100% y alturas estrato blando 1.0 a 9.0 m

Con el fin de realizar la modelación de Montecarlo se usan los parámetros de entrada para el tercer escenario contemplando la altura del agua (hw) como el 100% del espesor blando, para la altura de estrato blando se toman (z) de 1-9 m de espesor, adicionalmente para las variables cohesión (c), ángulo de fricción (θ) y peso unitario húmedo (γ) se usan los valores medios hallados en el tratamiento estadístico y sus desviaciones estándar y finalmente para el coeficiente sísmico horizontal (kh) se toma un valor de 0.29 obtenido según la Norma sismo resistente definido de acuerdo con la zona de amenaza sísmica para la ciudad. El valor de cada uno de estos datos de entrada se analiza a partir del método del talud infinito presentado en la ecuación del presente documento; (Ecuación 20) para el cálculo del factor de seguridad y (Ecuación 21) para el cálculo de la probabilidad de falla. Por otra parte para el cálculo de la probabilidad de falla se usan dos métodos, el primero corresponde a la obtención de la porción bajo la curva unitaria de la distribución de frecuencia, correspondiente a los valores del factor de seguridad por debajo de 1,0 y el segundo al número de iteraciones con FS menor que 1.0 en relación con el total del número de iteraciones realizadas (Anexo 10.10), de este resultado se tomará para la tabla de resultados de probabilidad de falla, el valor más conservador.

Los parámetros de entrada del método para este escenario se relacionan en la (tabla 24).

Tabla 24. Parámetros de entrada método Montecarlo

z	1,00-9.00	m		
hw	100%*z	m	Z min 1.0m	Z máx. 9 .0m
Kh	0,29			
C	4,25	Media	1,82	Desv. Est.
Ø	25,75	Media	5,79	Desv. Est.
γ	1,66	Media	0,15	Desv. Est.

Los valores de F.S medio para cada uno de los espesores de masa deslizante y ángulo de inclinación se presentan en la (Tabla 25) a partir de las 5000 iteraciones realizadas y contemplando una altura del nivel de agua del 100% de la altura del estrato blando, Adicionalmente basado en la clasificación de los factores de seguridad medios descritos en el capítulo 4.6.19 del presente documento, se presentan los valores calculados como; Niveles de amenaza alto para factores de seguridad menores a 1.1 y representados con color rojo, niveles de amenaza medio para factores de seguridad que van desde 1.1 hasta 1.5 y señalados en color naranja y nivel de amenaza baja para factores de seguridad mayores a 1.5 y marcados en color verde. Los resultados indican que para taludes 100% saturados y ángulos de inclinación de 5° y alturas del espesor del estrato máximo 6.50 m se presentan niveles de amenaza bajos en la comuna Universitaria, nivel de amenaza medio para ángulos de inclinación mayores a 30° y espesores del estrato blando de al menos 3 metros, finalmente en los casos en que los espesores son iguales o mayores a 4.5 m y el ángulo de inclinación es mínimo de 35° en el 100% se presentan niveles de amenaza altos.

Tabla 25. Niveles de amenaza en función del Factor de seguridad medio de los taludes de la comuna Universitaria, NAF 100%.

Espesor masa deslizante vs ángulo de inclinación de la masa deslizante

		Factor de seguridad medio																
		Espesor masa deslizante (m)																
		1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0
Ángulo	5°	7,39	5,08	3,93	3,24	2,78	2,45	2,20	2,01	1,85	1,73	1,62	1,54	1,46	1,39	1,34	1,29	1,24
	10°	6,08	4,17	3,22	2,65	2,26	1,99	1,79	1,63	1,50	1,40	1,31	1,24	1,17	1,12	1,07	1,03	0,99
	15°	5,25	3,59	2,76	2,26	1,93	1,69	1,52	1,38	1,27	1,18	1,10	1,04	0,98	0,94	0,90	0,86	0,83
	20°	4,70	3,20	2,46	2,01	1,71	1,49	1,33	1,21	1,11	1,03	0,96	0,90	0,85	0,81	0,77	0,74	0,71
	25°	4,33	2,94	2,25	1,83	1,55	1,36	1,21	1,09	1,00	0,92	0,86	0,81	0,76	0,72	0,69	0,66	0,63
	30°	4,11	2,78	2,12	1,72	1,45	1,26	1,12	1,01	0,92	0,85	0,79	0,74	0,69	0,66	0,62	0,59	0,57
	35°	3,99	2,69	2,04	1,65	1,39	1,21	1,07	0,96	0,87	0,80	0,74	0,69	0,65	0,61	0,58	0,55	0,53
	40°	3,97	2,67	2,02	1,63	1,37	1,18	1,04	0,93	0,85	0,77	0,72	0,67	0,62	0,59	0,55	0,52	0,50
	45°	4,06	2,72	2,05	1,64	1,38	1,19	1,04	0,93	0,84	0,77	0,71	0,66	0,61	0,57	0,54	0,51	0,48

En lo que tiene que ver con el concepto de probabilidad de falla, cuando se presenta altura de la tabla de agua del 100% de la altura del estrato, los valores arrojados en el método de Montecarlo se encuentran discriminados en la (Tabla 26) y clasificados a partir de lo definido en el presente documento en el capítulo 4.6.19, en este se definen los rangos de clasificación del nivel de amenaza en función de las probabilidades de falla, de acuerdo con esta clasificación se categorizan como niveles de amenaza bajas para probabilidades menores a 0.001 señaladas en color verde, para este análisis se evidencia que en ningún escenario se presentan probabilidades de falla bajas, Por otro lado los niveles de amenaza media se definen como aquellas que varían entre 0.001 y 0.16, para el presente estudio se evidencian cuando se tienen ángulos desde 5° hasta 45° y espesores que van desde 1.0 a 9.0 m de altura, finalmente se definen como probabilidad de falla alta aquellas en las que se presentan probabilidades mayores a 0.16, para este análisis se tienen probabilidades de falla alta con ángulos desde los 5° hasta los 45° y espesores que van desde 2.5 m hasta 9.0m.

Tabla 26. Resumen resultados probabilidad de falla, espesor masa deslizando vs ángulo de inclinación masa deslizando

		Probabilidad de falla																
		Espesor masa deslizando (m)																
		1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0
Ángulo (°)	5°	1,7%	2,1%	2,6%	3,2%	3,9%	4,7%	5,7%	6,7%	8,0%	9,4%	11,1%	12,9%	14,9%	17,1%	19,4%	22,0%	24,7%
	10°	2,1%	2,9%	3,8%	5,0%	6,5%	8,3%	10,5%	13,0%	16,0%	19,3%	23,1%	27,2%	31,6%	36,3%	41,2%	46,2%	51,1%
	15°	2,5%	3,7%	5,2%	7,3%	9,9%	13,1%	17,0%	21,6%	26,9%	32,6%	38,9%	45,4%	52,0%	58,5%	64,7%	70,5%	75,8%
	20°	3,0%	4,6%	6,8%	9,9%	13,9%	18,8%	24,7%	31,5%	39,0%	46,8%	54,8%	62,6%	69,9%	76,4%	82,0%	86,7%	90,4%
	25°	3,4%	5,5%	8,5%	12,6%	18,0%	24,6%	32,4%	41,1%	50,1%	59,2%	67,8%	75,6%	82,1%	87,5%	91,5%	94,5%	96,6%
	30°	3,7%	6,2%	9,9%	15,0%	21,7%	29,7%	39,0%	48,9%	58,9%	68,4%	76,7%	83,7%	89,1%	93,1%	95,9%	97,7%	98,7%
	35°	4,0%	6,8%	11,0%	16,9%	24,4%	33,5%	43,7%	54,4%	64,7%	74,1%	82,0%	88,1%	92,7%	95,7%	97,6%	98,8%	99,4%
	40°	4,1%	7,1%	11,6%	17,8%	25,9%	35,5%	46,1%	57,1%	67,5%	76,8%	84,3%	90,0%	94,1%	96,7%	98,3%	99,2%	99,6%
	45°	4,1%	7,1%	11,6%	17,8%	25,9%	35,5%	46,1%	57,1%	67,5%	76,8%	84,3%	90,1%	94,1%	96,7%	98,3%	99,2%	99,6%

Con el fin de representar gráficamente los resultados obtenidos, en la (Figura 46) se expresan los factores de seguridad en fusión del espesor blando. Adicionalmente en la gráfica se evidencia una línea roja que representa el límite de factor de seguridad mínimo aceptable. En el análisis de los datos para la comuna universitaria bajo estas condiciones se evidencia que en los casos que se presenten espesores de masa deslizante mayores a 4.5 m, el factor de seguridad se encuentra por debajo del mínimo aceptable.

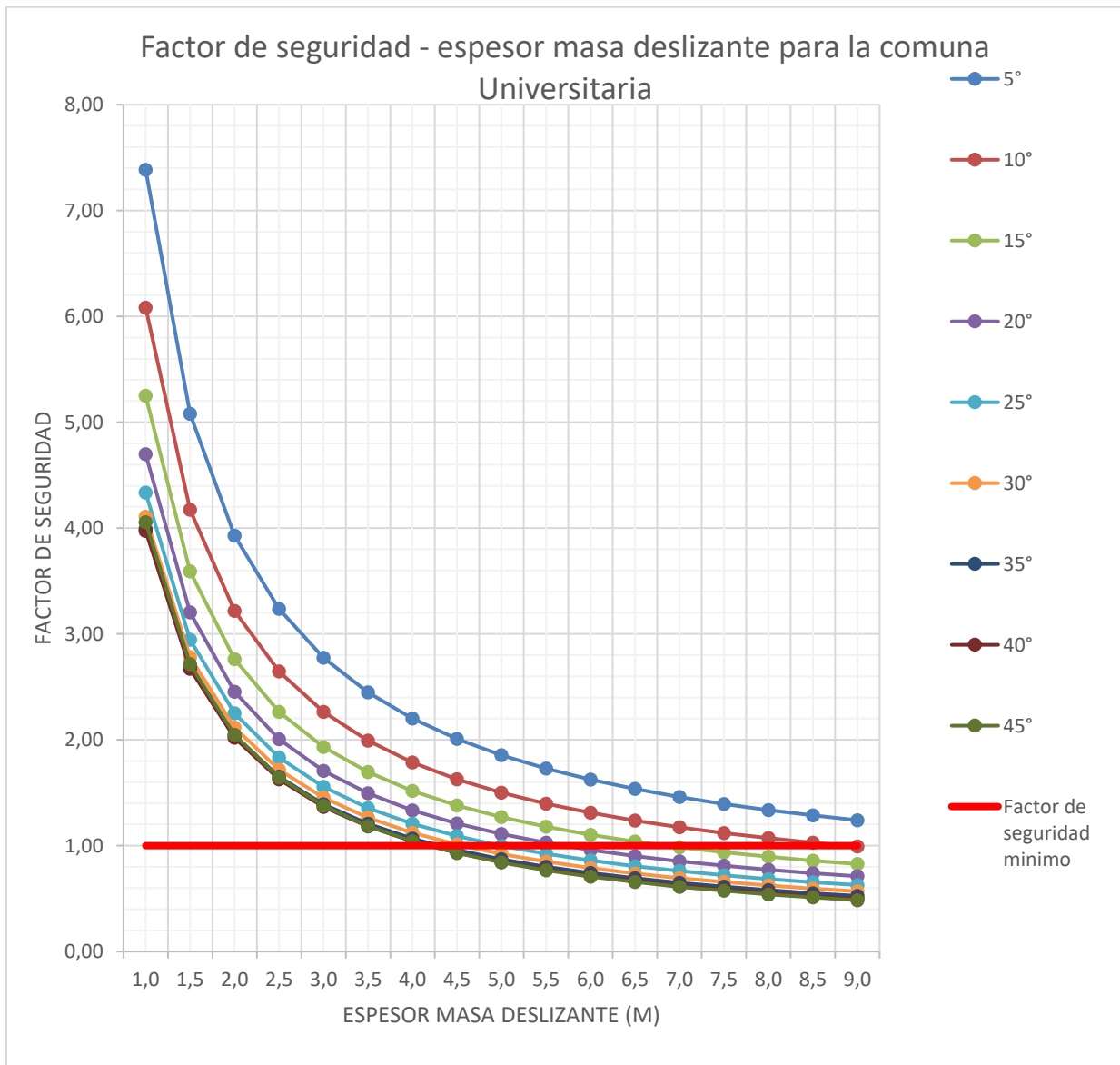


Figura 46. Gráficas FS medio - espesor de la masa deslizante comuna Universitaria, NAF 100%

Para el caso de gráficas generadas a partir de los resultados obtenidos de factor de seguridad vs ángulo de inclinación del talud para la comuna Universitaria se agrupan y describen en la (Figura 47), esta gráfica permite interpretar que a partir de ángulos de inclinación de 10° se presentan factores de seguridad por debajo de los mínimos aceptables, para los casos que se tienen espesores del estrato representativos.

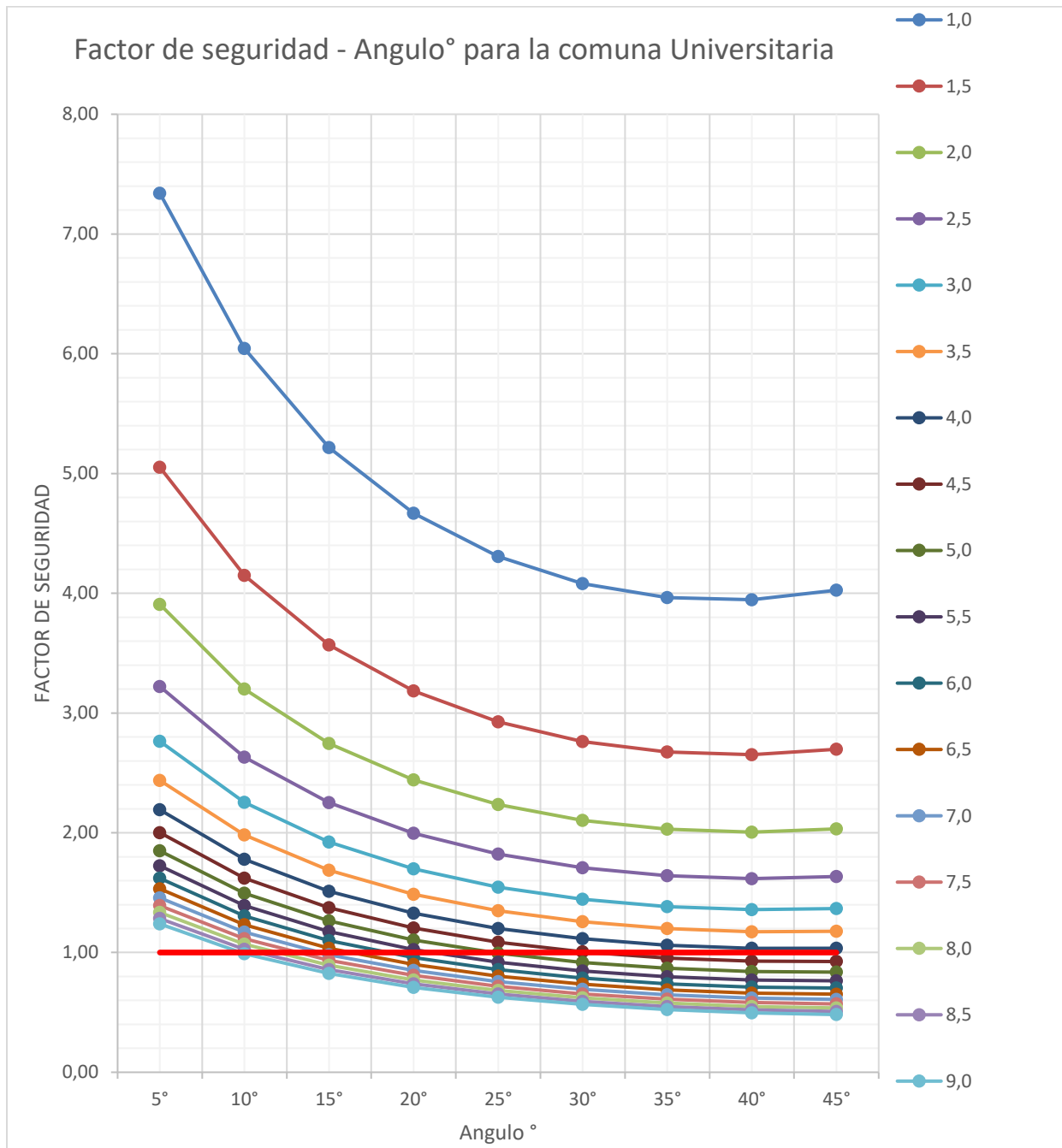


Figura 47. Factor de seguridad - ángulo de inclinación comuna Universitaria NAF100%

En lo que tiene que ver con el cálculo de la probabilidad de falla vs espesor de la masa deslizando se presenta la (Figura 48) en esta se encuentran los valores de probabilidad de falla en función del espesor del estrato blando para la comuna Universitaria, dicho estrato corresponde al estrato potencialmente deslizando, Específicamente para espesores mayores o iguales a 2.5 m se podrán encontrar probabilidades de falla altas a medida que aumentan los ángulos de inclinación del estrato.

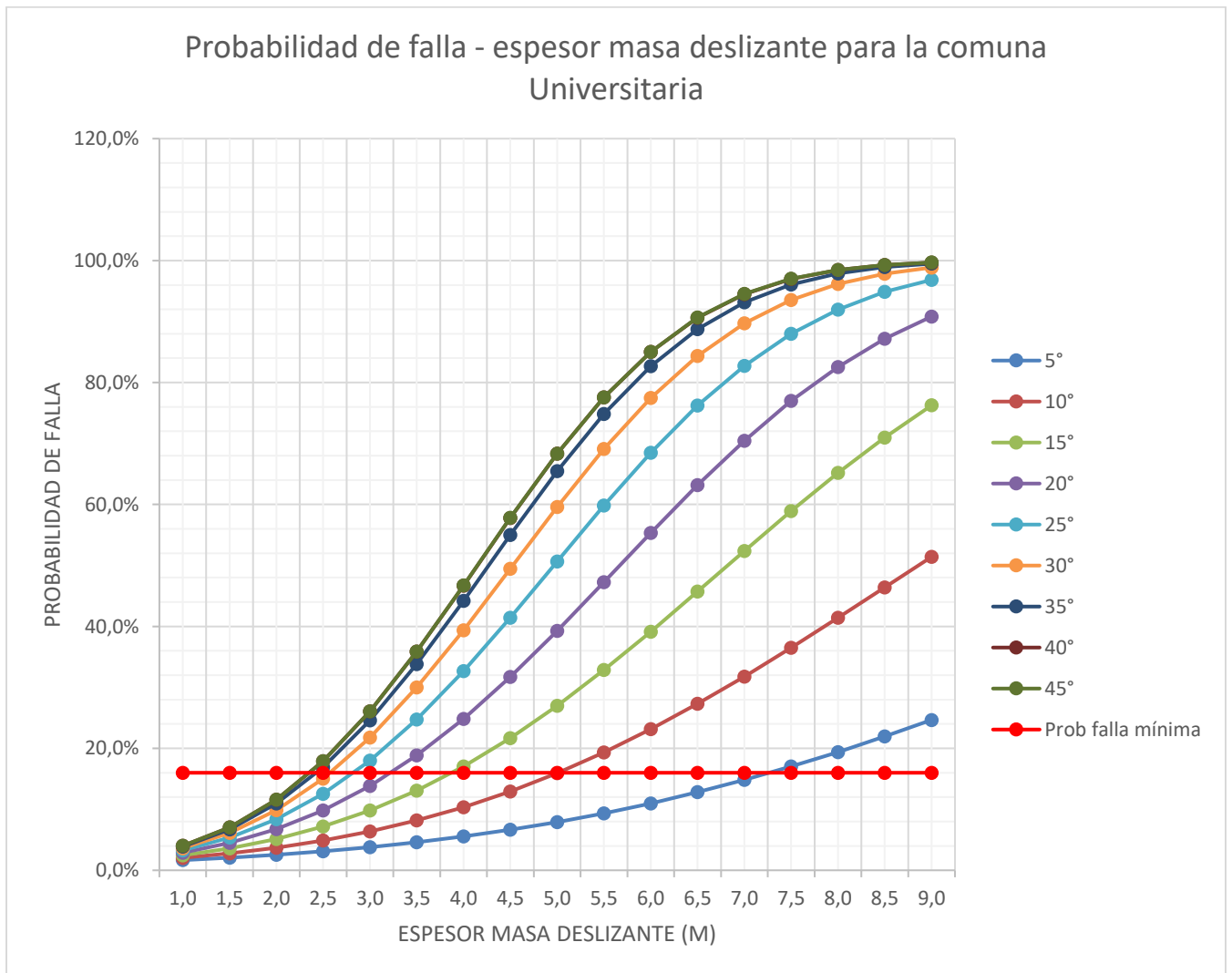


Figura 48. Probabilidad de falla – Espesor de la masa deslizando comuna Universitaria NAF 100%.

En lo que tiene que ver con el cálculo de la probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud se presenta la (Figura 49) por medio de este análisis se genera una gráfica en la que se expresan los porcentajes de probabilidad de falla en función del ángulo de inclinación de los taludes de la comuna Universitaria, para el caso se podrán presentar probabilidades falla altas a partir de los 5° y a medida que se presentan aumentos en los ángulos de inclinación de los taludes ya que favorecen los movimientos planares.

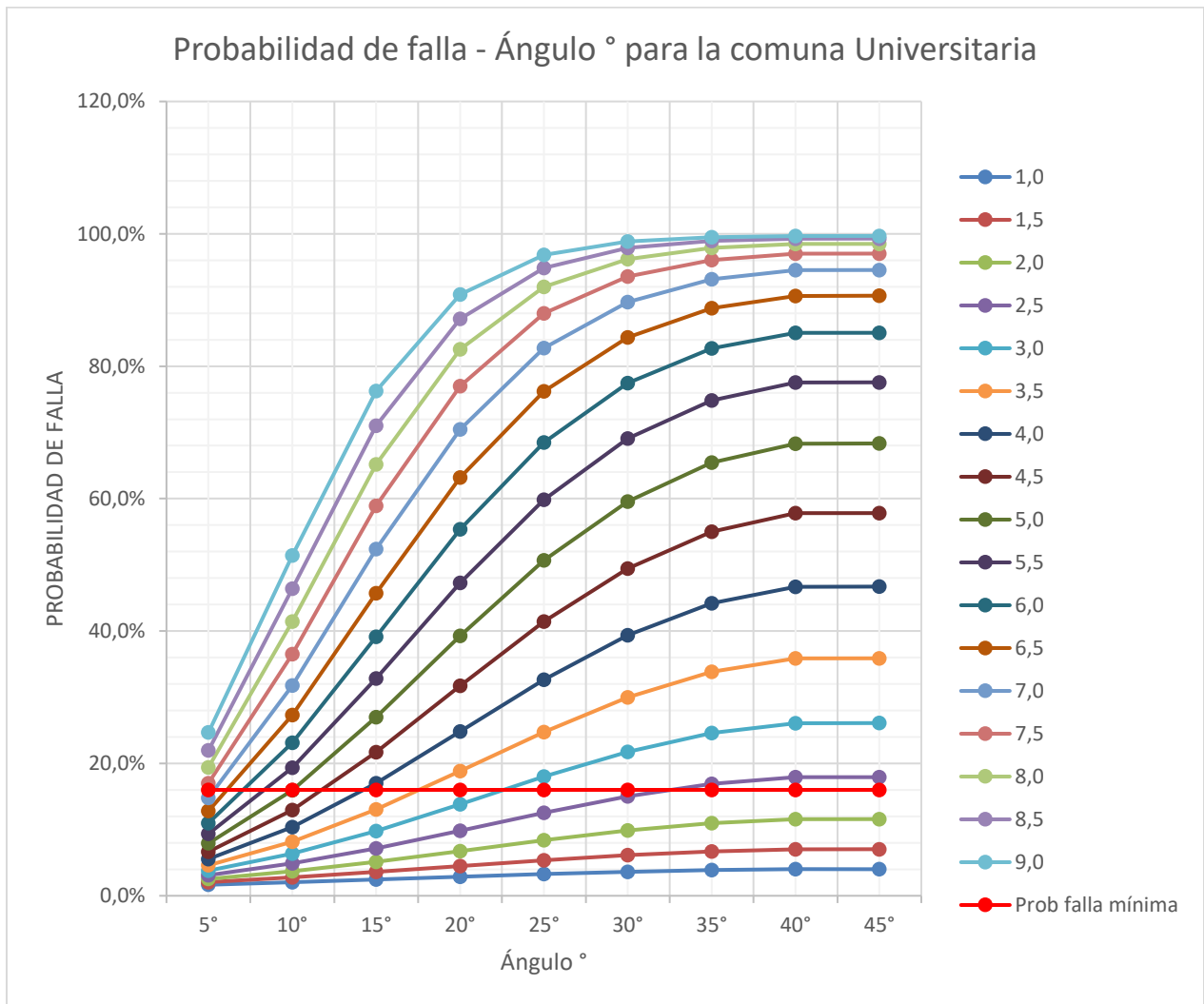


Figura 49. Probabilidad de falla – Ángulo de inclinación comuna Universitaria NAF 100%.

7. Estudio de caso

Con el fin de validar los parámetros geotécnicos de los estratos blandos de la comuna Universitaria tales como; Peso unitario, ángulo de fricción y cohesión, usados en el desarrollo del presente trabajo, y definir si estos se encuentran dentro de rangos típicos y veraces, se realizará un análisis retrospectivo en un talud ubicado dentro de la Comuna Universitaria, en donde se presentaron condiciones de inestabilidad en un momento específico, en dicho análisis retrospectivo se usarán los datos de la media hallados a partir del tratamiento estadístico realizado a los datos de laboratorio de la comuna recopilados , dicho análisis se realizará bajo dos condiciones; sin nivel freático y con condiciones saturadas, Adicionalmente con el fin de representar los escenarios típicos también definidos para el método de Montecarlo para estabilidad de taludes se realizará el análisis en condición dinámica y definiendo fallas de tipo planar.

7.1.Localización de la zona de estudio

El área de interés (Figuras 50 y 51) se encuentra localizada al sur del área urbana del municipio de Manizales, y dentro de la comuna Universitaria, limitando al sur con el barrio Vivienda Popular, al norte con el barrio Palermo, al oeste con el barrio Fátima y al este con el Cerro Sancancio.



Figura 50. Localización general del sector analizado dentro de la comuna Universitaria
(Tomado de Google earth, 2021)



Figura 51. Localización específica para análisis retrospectivo sector Aguacate de la comuna Universitaria.
(Tomado de Google earth 2021)

7.2.Evento ocurrido en el sector

En el sector analizado se presenta un fenómeno de inestabilidad en el año 2017, durante los episodios de precipitación que dieron lugar el día 19 de abril, el evento fue tal, que la lluvia acumulada para la fecha, supero los valores de los datos históricos para la ciudad. En un periodo de 6 horas, se tuvo un acumulado diario de 116.2 mm., dicha información se presenta en la (Tabla 27).

Tabla 27. Registro Horario de Precipitaciones. Estación Meteorológica Posgrados (IDEA, Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales, 2017)



7.3.Registro fotográfico del sector



Figura 52. Registro fotográfico sitio inestable sector Aguacate de la comuna Universitaria.
(Fuente propia)

7.4.Geología local

Las formaciones predominantes en la zona de estudio corresponden a los depósitos de caída piroclástica (cenizas volcánicas) infrayacidas por depósitos de flujos de lodo impermeables de consistencia alta, estos asociados a la Formación Casabianca la cual está constituida por clastos de rocas ígneas embebidas en una matriz arcillosa. En el área de estudio el flujo de escombros aflora de manera clara en todo el talud objeto de estudio, en donde se aprecia un depósito altamente meteorizado de color naranja, en el cual se aprecian de manera incipiente los bloques de las rocas que lo constituyen, embebidos en matriz de color café claro y habana

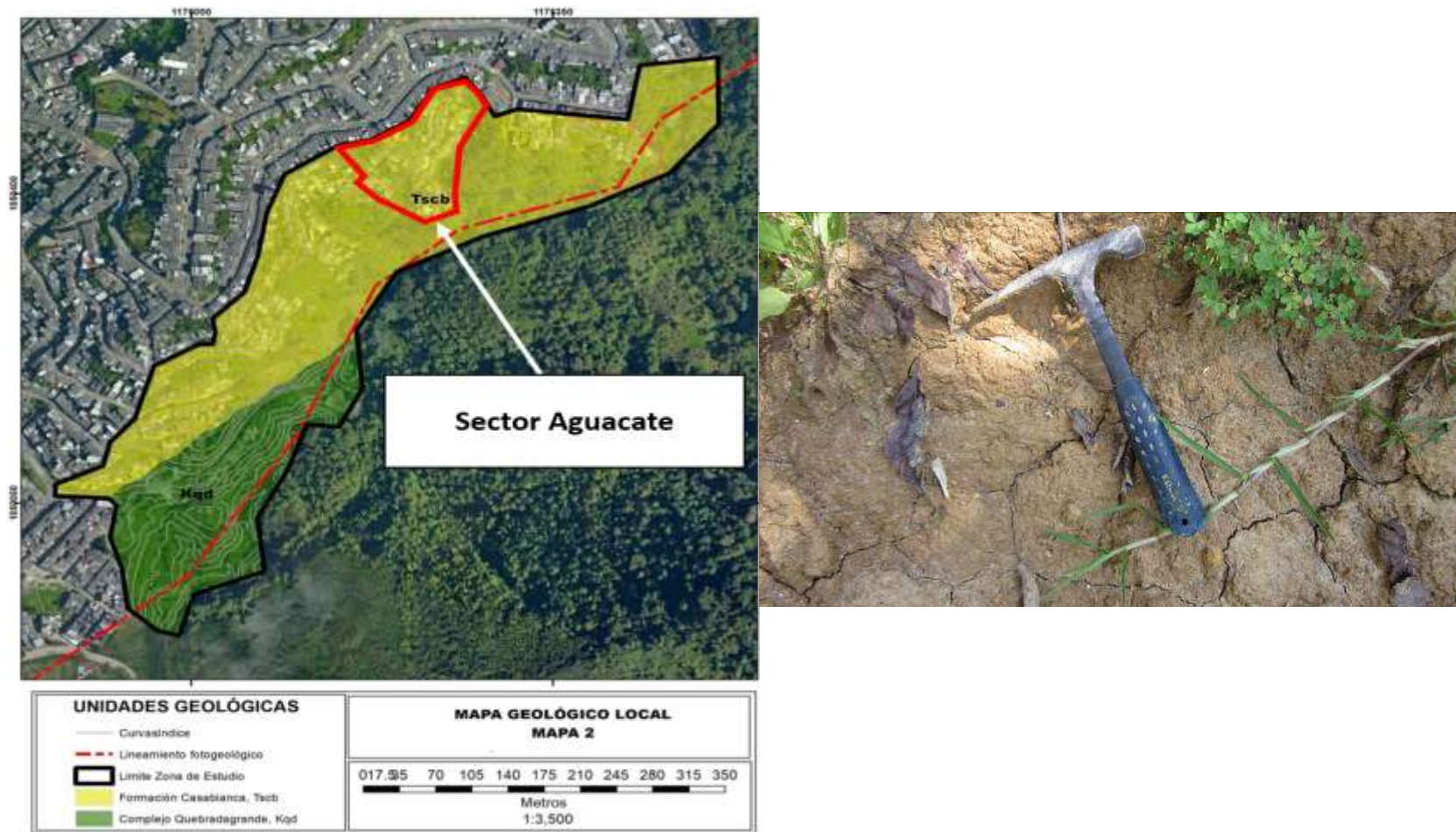


Figura 53. Mapa geológico sector Aguacate de la comuna Universitaria (Fuente propia)

7.5. Formaciones superficiales

Las formaciones superficiales del sector, corresponden a llenos que se asocian al desarrollo urbanístico del sector y ceniza volcánica, dichos depósitos blandos en el sector presentan espesores promedio de 5.5 metros y 6.00 metros.

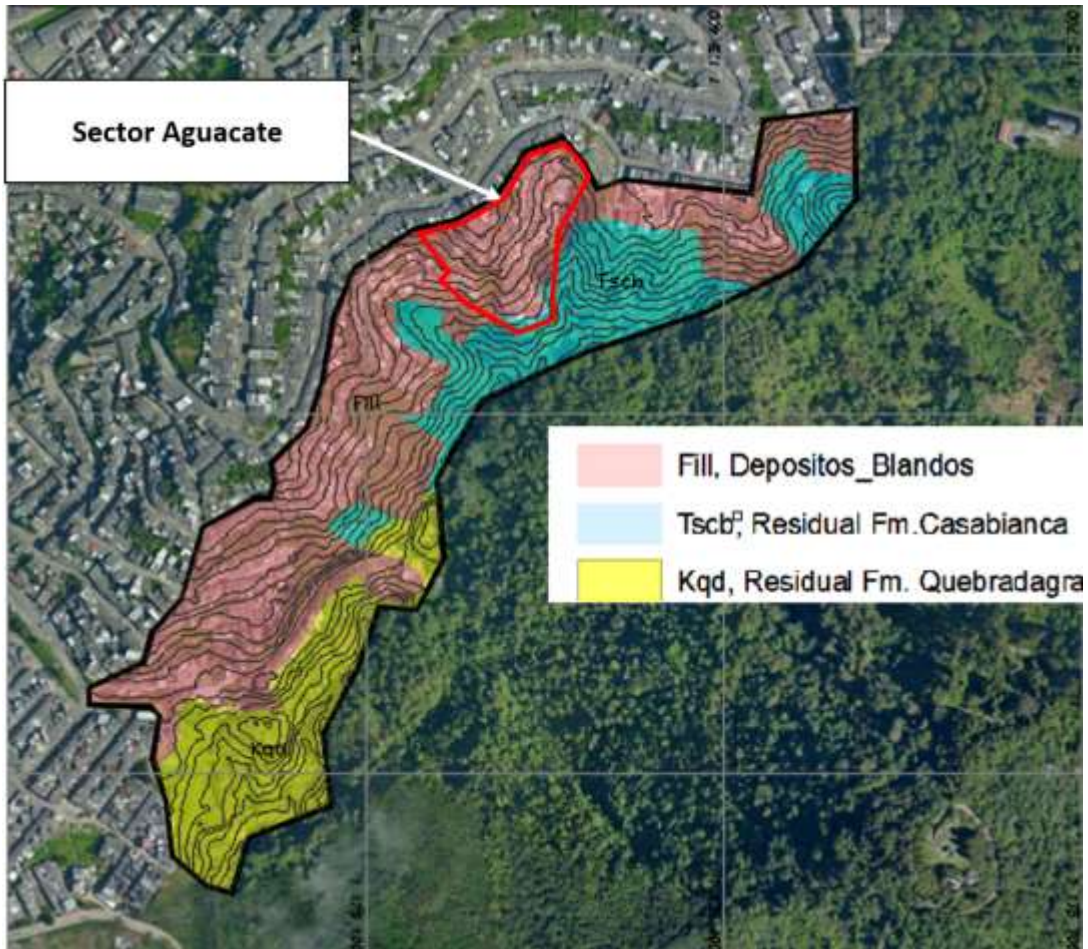


Figura 54. Mapa formaciones superficiales sector Aguacate de la comuna Universitaria.
(Fuente propia)

7.6. Clasificación geotécnica de los materiales

Para el análisis retrospectivo se usan los parámetros hallados a partir del tratamiento estadístico realizado para los estratos blandos (Lleno y depósitos de caída piroclástica), adicionalmente se usan parámetros con mejores características geotécnicas para los estratos que infrayacen los depósitos blandos y que para el caso se asocian a la formación Casabianca.

Tabla 28. Resultado del tratamiento estadístico de las variables peso unitario, cohesión y ángulo de fricción.

Parámetro	Tamaño muestra	Valor mínimo	Valor máximo	Media	Desviación estándar	Coefficiente de asimetría	Coefficiente de variación
Peso unitario (gr/cm ³)	79	1,11	1,98	1,66	0,15	-0,74	0,09
Cohesión (t/m ²)	79	0,83	9,80	4,25	1,82	0,49	0,43
Ángulo de fricción (°)	79	13,75	38,53	25,75	5,79	0,00	0,22

7.7. Topografía del sector

A continuación, se presenta la topografía del sector usada para definir el perfil del talud que presentó signos inestabilidad.

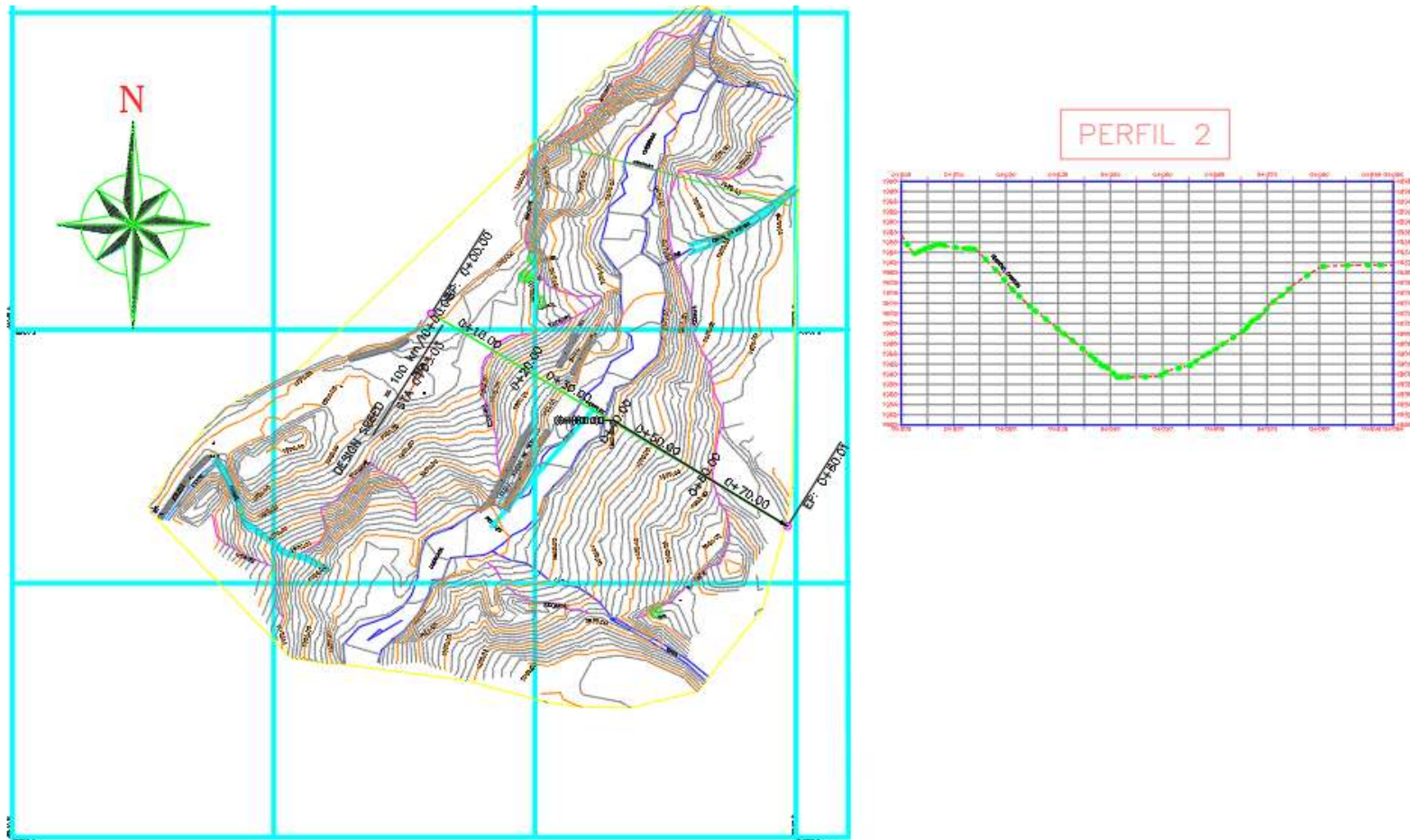


Figura 55. Topografía y perfil típico del sector (Tomado del archivo de la empresa Quasar ingenieros consultores s.a.s)

7.8. Análisis retrospectivo de estabilidad de taludes

Una vez identificados cada uno de los datos de entrada se procede a realizar el análisis de estabilidad, El análisis de estabilidad presentado a continuación se realizó mediante el software SLOPE de la firma GeoStru en su versión 2021.30.6.1458. El método de estabilidad que será empleado es el de dovelas de Janbú, que es un método riguroso de análisis de estabilidad, el cual se puede utilizar para estimar el factor de seguridad de superficies de falla de cualquier forma y a taludes con perfiles de suelo heterogéneo. La solución simplificada es la más conocida. Esta solución emplea la siguiente ecuación.

$$\text{Ecuación 29. } FS = \frac{\sum(C1 + \frac{Wi}{bi} - ui) + \text{Tan}\phi_i * \frac{ni}{n\alpha}}{\sum(Wi + \text{tan}\alpha i + wi * \frac{amax}{g})}$$

Dónde:

C: Cohesión

W: Peso de la dovela

b: Ancho de la dovela

u: Presión de poros en la dovela

n: Factor n alfa

α_i : Ángulo de inclinación medido en la base de la dovela

ϕ : Ángulo de fricción del terreno

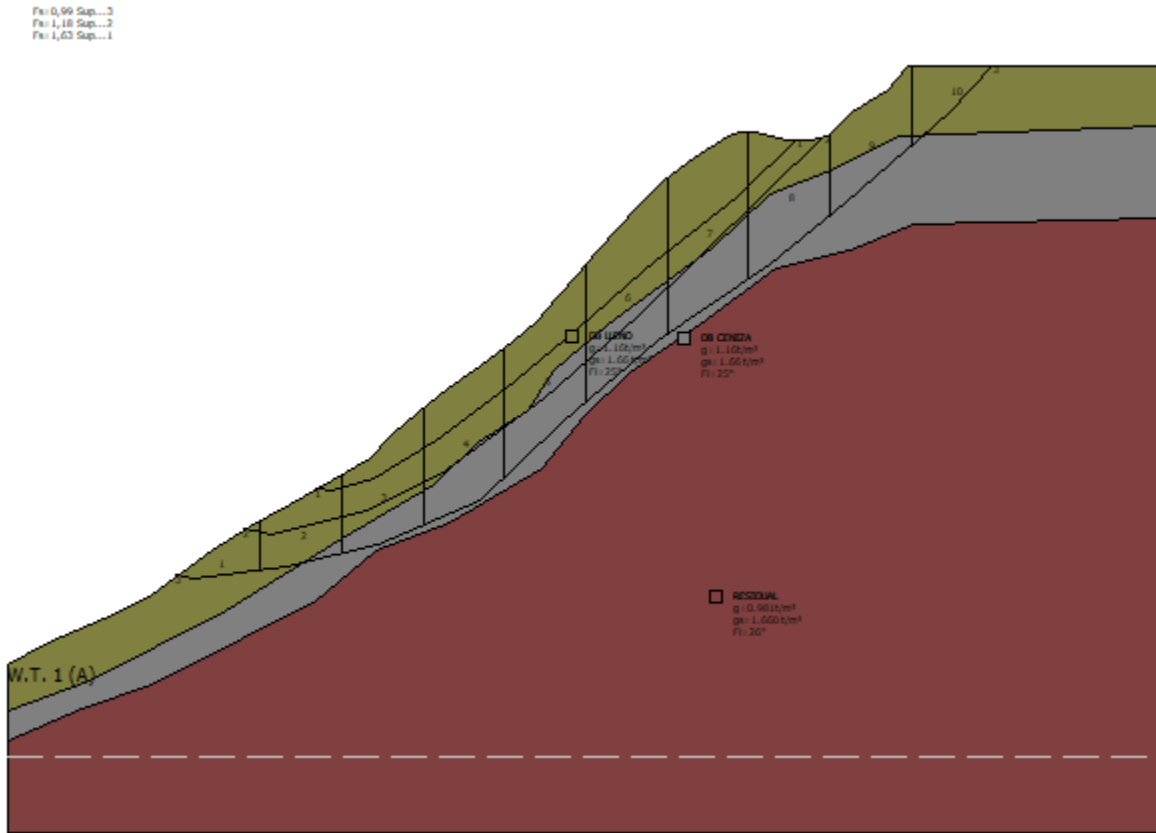
Amax: Aceleración sísmica

G: Gravedad

Por medio de una graficas se obtiene el valor de $n\alpha$ en función del ángulo ϕ y del valor de la $\text{Tan}\alpha_i / Fs$.

Janbú utiliza además un factor de corrección f_0 , para considerar de alguna manera la existencia de las fuerzas entre tajadas. Este factor se estima con base en la relación d/l del deslizamiento y el tipo de parámetros de resistencia al corte que se usan en el análisis.

7.8.1. Análisis de estabilidad de taludes retrospectivo condición con sismo y nivel de aguas freáticas del 0%.



Análisis de Estabilidad de Taludes con: JANBU (1967)

Cálculo realizado de acuerdo a	NTC 2008 & Circ.
Número de estratos	3,0
Número rebanadas	10,0
Grado de seguridad aceptable	1,3
Coefficiente parcial resistencia	1,0
Parámetros geotécnicos a usar. Ángulo de rozamiento interno:	Pico
Análisis	Condición drenada
Superficie de cualquier forma	

Coefficiente sísmico horizontal	0,29
Coefficiente sísmico vertical	0,173

Vértices perfil

Nr	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	1,73	1,0
3	4,17	2,0
4	6,14	3,0
5	7,61	4,0
6	8,85	5,0
7	10,51	6,0
8	12,29	6,96
9	14,05	8,0
10	15,75	9,0
11	16,72	10,0
12	17,8	11,0
13	19,11	12,0
14	20,52	13,0
15	21,93	14,0
16	23,04	15,0
17	23,9	16,0
18	24,77	17,0
19	25,64	18,0
20	26,51	19,0
21	27,42	20,0
22	28,39	21,0
23	29,8	22,0
24	31,3	23,0
25	31,82	23,1
26	32,41	23,11
27	33,1	23,0
28	33,8	22,83
29	34,82	22,82
30	35,62	23,0
31	36,65	24,0
32	38,18	25,0
33	39,13	26,0
34	50,0	26,0

Vértices estrato.....1

N	X (m)	y (m)
1	0,0	-2,0
2	3,54	-0,67
3	9,46	2,35
4	14,48	5,52
5	18,54	7,86
6	20,4	9,65
7	22,6	11,02
8	23,7	12,81
9	26,04	14,81
10	30,58	18,11
11	33,13	20,45
12	35,53	21,41

N	X (m)	y (m)
13	38,77	22,92
14	50,0	23,35

Vértices estrato.....2

N	X (m)	y (m)
1	0,0	-3,25
2	3,2	-1,91
3	6,22	-0,81
4	10,21	1,18
5	13,31	2,77
6	15,99	4,97
7	19,23	6,21
8	23,22	8,54
9	25,01	10,82
10	27,0	12,67
11	30,03	14,81
12	33,33	17,21
13	36,57	18,04
14	39,39	19,14
15	50,0	19,37

Vértices superficie Nr...1

N	X m	y m
1	13,38	7,72
2	14,07	7,56
3	15,93	8,14
4	18,63	9,79
5	21,63	11,98
6	24,65	14,56
7	27,62	17,18
8	31,73	20,31
9	34,28	22,89

Vértices superficie Nr...2

N	X m	y m
1	10,22	5,94
2	11,51	5,7
3	15,51	6,68
4	18,81	8,3
5	23,24	11,54
6	27,35	15,11
7	35,57	23,03

Vértices superficie Nr...3

N	X m	y m
1	7,31	3,92
2	8,05	3,76
3	12,11	4,3
4	16,05	5,22
5	20,49	7,16
6	24,11	10,51
7	28,22	14,08
8	33,08	17,43
9	36,43	20,14
10	40,92	23,97
11	42,83	26,06

Coefficientes de acciones parciales

Desventajas: permanente, variable	1,0	1,0
Favorable: permanente, variable	1,0	1,0

Coefficientes parciales parámetros geotécnicos del terreno

Tangente ángulo de resistencia al corte	1,25
Cohesión efectiva	1,25
Cohesión no drenada	1,4
Reducción parámetros geotécnicos terreno	Si

Estratigrafía

Estrato	Cohesión (t/m ²)	Cohesión no drenada (t/m ²)	Ángulo de resistencia al corte (°)	Peso específico (t/m ³)	Peso saturado (t/m ³)	Litología
1	4.5		25.75	1.160	1.660	DB LLENO
2	4.5		25.75	1.160	1.660	DB CENIZA
3	4.9		26.90	0.981	1.86	RESIDUAL

Superficie Nr...1 Factor de seguridad=1,63

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (t)	Kh•Wi (t)	Kv•Wi (t)	c (t/m ²)	Fi (°)	Ui (t)	N'i (t)	Ti (t)
1	2,07	9,5	2,1	1,04	0,3	0,18	2,0	20,5	0,0	0,5	3,3
2	2,07	29,2	2,37	3,08	0,89	0,53	2,0	20,5	0,0	1,4	4,4
3	2,07	34,0	2,5	4,29	1,25	0,74	2,0	20,5	0,0	2,3	5,2
4	2,07	36,4	2,57	4,36	1,26	0,75	2,0	20,5	0,0	2,2	5,5
5	2,07	40,6	2,73	4,34	1,26	0,75	2,0	20,5	0,0	1,8	6,0
6	2,07	41,1	2,75	5,66	1,64	0,98	2,0	20,5	0,0	3,2	6,5
7	2,07	40,7	2,73	7,01	2,03	1,21	2,0	20,5	0,0	4,7	7,0
8	2,07	37,2	2,6	7,67	2,23	1,33	2,0	20,5	0,0	5,6	6,7
9	2,07	39,0	2,66	7,16	2,08	1,24	2,0	20,5	0,0	4,9	6,8
10	2,07	45,3	2,95	2,89	0,84	0,5	2,0	20,5	0,0	-0,2	6,1

Superficie Nr...2 Factor de seguridad=1,18

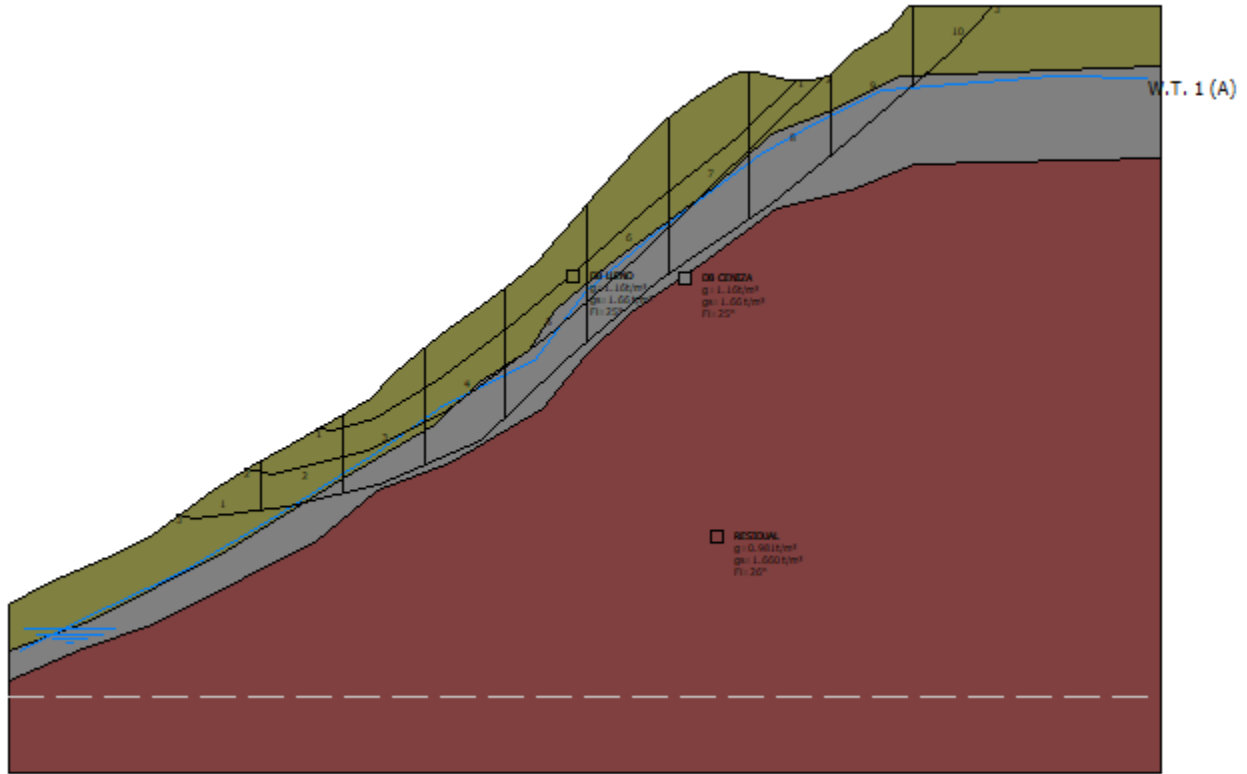
Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (t)	Kh•Wi (t)	Kv•Wi (t)	c (t/m ²)	Fi (°)	Ui (t)	N'i (t)	Ti (t)
1	2,51	2,7	2,52	1,84	0,53	0,32	2,0	20,5	0,0	1,6	5,7
2	2,51	13,6	2,59	4,99	1,45	0,86	2,0	20,5	0,0	3,5	6,8
3	2,51	25,8	2,79	7,8	2,26	1,35	2,0	20,5	0,0	5,0	8,4
4	2,51	32,7	2,99	9,83	2,85	1,7	2,0	20,5	0,0	6,3	10,0
5	2,51	36,3	3,12	9,98	2,9	1,73	2,0	20,5	0,0	6,1	10,7
6	2,51	40,3	3,3	11,52	3,34	1,99	2,0	20,5	0,0	7,1	12,3
7	2,51	41,8	3,37	13,53	3,92	2,34	2,0	20,5	0,0	9,0	13,7
8	2,51	43,9	3,49	13,65	3,96	2,36	2,0	20,5	0,0	8,9	14,5
9	2,51	44,0	3,5	10,92	3,17	1,89	2,0	20,5	0,0	6,1	13,1
10	2,51	43,9	3,49	3,09	0,9	0,53	2,0	20,5	0,0	-1,9	8,9

Superficie Nr...3 Factor de seguridad=0,99

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (t)	Kh•Wi (t)	Kv•Wi (t)	c (t/m ²)	Fi (°)	Ui (t)	N'i (t)	Ti (t)
1	3,53	4,2	3,54	4,91	1,43	0,85	2,0	20,5	0,0	4,1	10,5
2	3,53	11,3	3,6	11,18	3,24	1,93	2,0	20,5	0,0	8,8	13,0
3	3,53	19,2	3,74	16,65	4,83	2,88	2,0	20,5	0,0	12,5	15,6
4	3,53	30,4	4,1	21,99	6,38	3,8	2,0	20,5	0,0	15,5	19,7
5	3,53	42,4	4,78	22,84	6,62	3,95	2,0	20,5	0,0	14,4	24,6
6	3,53	40,2	4,63	26,72	7,75	4,62	2,0	20,5	0,0	18,4	25,7
7	3,53	34,5	4,29	27,93	8,1	4,83	2,0	20,5	0,0	20,4	23,9
8	3,53	37,9	4,48	19,04	5,52	3,29	2,0	20,5	0,0	11,6	20,4
9	3,53	40,1	4,62	14,31	4,15	2,48	2,0	20,5	0,0	6,7	18,7
10	3,53	44,5	4,95	7,11	2,06	1,23	2,0	20,5	0,0	-1,3	16,1

7.8.2. Análisis de estabilidad de taludes retrospectivo condición con sismo y nivel de aguas freáticas del 50% de estratos blandos.

Fig 0,77 Sep...3
Fig 1,16 Sep...2
Fig 1,63 Sep...1



Análisis de Estabilidad de Taludes con: JANBU (1967)

Cálculo realizado de acuerdo a	NTC 2008 & Circ.
Número de estratos	3,0
Número rebanadas	10,0
Grado de seguridad aceptable	1,3
Coefficiente parcial resistencia	1,0
Parámetros geotécnicos a usar. Ángulo de rozamiento interno:	Pico
Análisis	Condición drenada
Superficie de cualquier forma	

Coefficiente sísmico horizontal	0,29
Coefficiente sísmico vertical	0,173

Vértices perfil

Nr	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	1,73	1,0
3	4,17	2,0

Nr	X (m)	y (m)
4	6,14	3,0
5	7,61	4,0
6	8,85	5,0
7	10,51	6,0
8	12,29	6,96
9	14,05	8,0
10	15,75	9,0
11	16,72	10,0
12	17,8	11,0
13	19,11	12,0
14	20,52	13,0
15	21,93	14,0
16	23,04	15,0
17	23,9	16,0
18	24,77	17,0
19	25,64	18,0
20	26,51	19,0
21	27,42	20,0
22	28,39	21,0
23	29,8	22,0
24	31,3	23,0
25	31,82	23,1
26	32,41	23,11
27	33,1	23,0
28	33,8	22,83
29	34,82	22,82
30	35,62	23,0
31	36,65	24,0
32	38,18	25,0
33	39,13	26,0
34	50,0	26,0

Nivel freático

Nr.	X (m)	y (m)
1	0,53	-1,97
2	2,7	-0,84
3	7,65	1,51
4	11,74	3,94
5	15,99	6,63
6	18,94	8,72
7	22,85	10,63
8	25,02	13,58
9	28,15	16,19
10	32,67	19,57
11	35,1	20,96
12	37,96	22,35
13	45,43	22,96
14	49,51	22,87

Vértices estrato.....1

N	X (m)	y (m)
1	0,0	-2,0
2	3,54	-0,67
3	9,46	2,35
4	14,48	5,52
5	18,54	7,86
6	20,4	9,65
7	22,6	11,02
8	23,7	12,81
9	26,04	14,81
10	30,58	18,11
11	33,13	20,45
12	35,53	21,41
13	38,77	22,92
14	50,0	23,35

Vértices estrato.....2

N	X (m)	y (m)
1	0,0	-3,25
2	3,2	-1,91
3	6,22	-0,81
4	10,21	1,18
5	13,31	2,77
6	15,99	4,97
7	19,23	6,21
8	23,22	8,54
9	25,01	10,82
10	27,0	12,67
11	30,03	14,81
12	33,33	17,21
13	36,57	18,04
14	39,39	19,14
15	50,0	19,37

Vértices superficie Nr...1

N	X m	y m
1	13,38	7,72
2	14,07	7,56
3	15,93	8,14
4	18,63	9,79
5	21,63	11,98
6	24,65	14,56
7	27,62	17,18
8	31,73	20,31
9	34,28	22,89

Vértices superficie Nr...2

N	X m	y m
1	10,22	5,94
2	11,51	5,7
3	15,51	6,68
4	18,81	8,3
5	23,24	11,54
6	27,35	15,11
7	35,57	23,03

Vértices superficie Nr...3

N	X m	y m
1	7,31	3,92
2	8,05	3,76
3	12,11	4,3
4	16,05	5,22
5	20,49	7,16
6	24,11	10,51
7	28,22	14,08
8	33,08	17,43
9	36,43	20,14
10	40,92	23,97
11	42,83	26,06

Coefficientes de acciones parciales

Desventajas: permanente, variable	1,0	1,0
Favorable: permanente, variable	1,0	1,0

Coefficientes parciales parámetros geotécnicos del terreno

Tangente ángulo de resistencia al corte	1,25
Cohesión efectiva	1,25
Cohesión no drenada	1,4
Reducción parámetros geotécnicos terreno	Si

Estratigrafía

Estrato	Cohesión (t/m ²)	Cohesión no drenada (t/m ²)	Ángulo de resistencia al corte (°)	Peso específico (t/m ³)	Peso saturado (t/m ³)	Litología	
1	4.5		25.75	1.16	1.66	DB LLENO	
2	4.5		25.75	1.16	1.66	DB CENIZA	
3	5.5		26.90	0.981	1.86	RESIDUAL	

Superficie Nr...1 Factor de seguridad=1,63

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (t)	Kh•Wi (t)	Kv•Wi (t)	c (t/m ²)	Fi (°)	Ui (t)	N'i (t)	Ti (t)
1	2,07	9,5	2,1	1,04	0,3	0,18	2,0	20,5	0,0	0,5	3,3
2	2,07	29,2	2,37	3,08	0,89	0,53	2,0	20,5	0,0	1,4	4,4
3	2,07	34,0	2,5	4,29	1,25	0,74	2,0	20,5	0,0	2,3	5,2
4	2,07	36,4	2,57	4,36	1,26	0,75	2,0	20,5	0,0	2,2	5,5
5	2,07	40,6	2,73	4,34	1,26	0,75	2,0	20,5	0,0	1,8	6,0
6	2,07	41,1	2,75	5,66	1,64	0,98	2,0	20,5	0,0	3,2	6,5
7	2,07	40,7	2,73	7,01	2,03	1,21	2,0	20,5	0,0	4,7	7,0
8	2,07	37,2	2,6	7,67	2,23	1,33	2,0	20,5	0,0	5,6	6,7
9	2,07	39,0	2,66	7,16	2,08	1,24	2,0	20,5	0,0	4,9	6,8
10	2,07	45,3	2,95	2,89	0,84	0,5	2,0	20,5	0,0	-0,2	6,1

Superficie Nr...2 Factor de seguridad=1,16

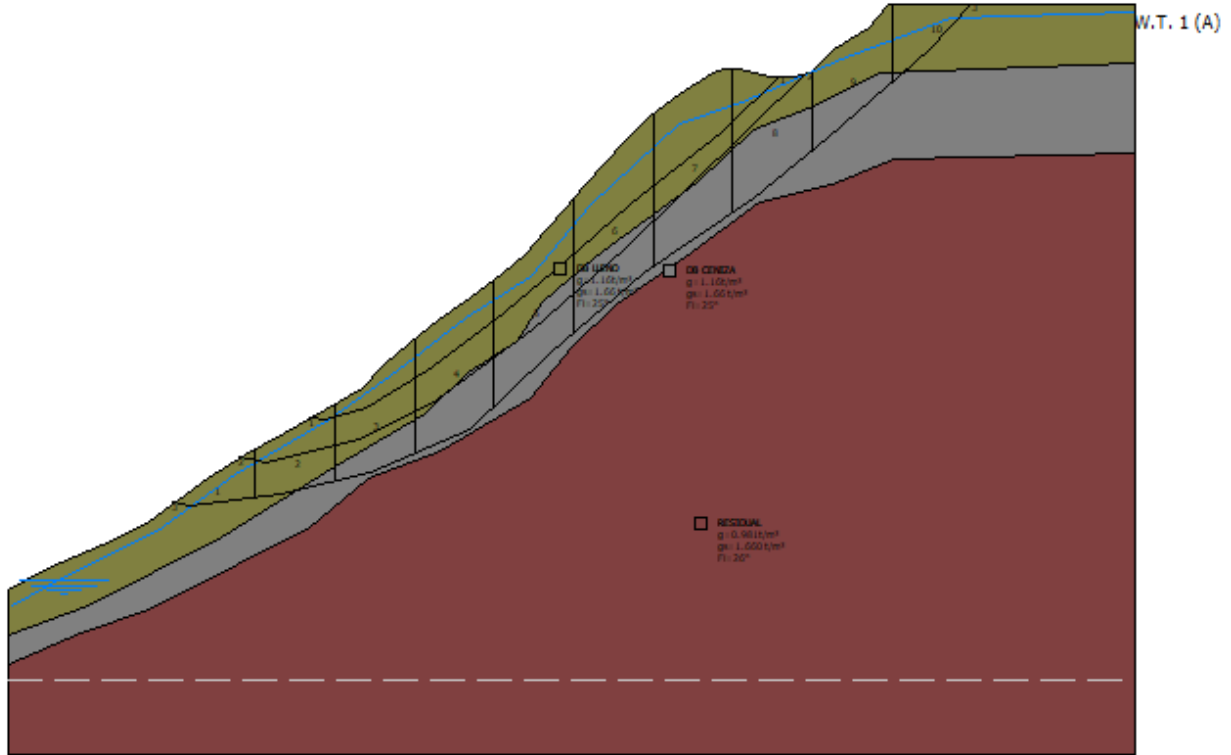
Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (t)	Kh•Wi (t)	Kv•Wi (t)	c (t/m ²)	Fi (°)	Ui (t)	N'i (t)	Ti (t)
1	2,51	2,7	2,52	1,84	0,53	0,32	2,0	20,5	0,0	1,6	5,8
2	2,51	13,6	2,59	4,99	1,45	0,86	2,0	20,5	0,0	3,5	6,9
3	2,51	25,8	2,79	7,8	2,26	1,35	2,0	20,5	0,0	5,0	8,5
4	2,51	32,7	2,99	10,03	2,91	1,74	2,0	20,5	0,4	6,0	10,1
5	2,51	36,3	3,12	9,98	2,9	1,73	2,0	20,5	0,0	6,0	10,9
6	2,51	40,3	3,3	11,61	3,37	2,01	2,0	20,5	0,2	6,9	12,5
7	2,51	41,8	3,37	14,04	4,07	2,43	2,0	20,5	1,0	8,4	13,7
8	2,51	43,9	3,49	13,75	3,99	2,38	2,0	20,5	0,2	8,6	14,6
9	2,51	44,0	3,5	10,92	3,17	1,89	2,0	20,5	0,0	6,0	13,3
10	2,51	43,9	3,49	3,09	0,9	0,53	2,0	20,5	0,0	-1,9	9,0

Superficie Nr...3 Factor de seguridad=0,77

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (t)	Kh•Wi (t)	Kv•Wi (t)	c (t/m ²)	Fi (°)	Ui (t)	N'i (t)	Ti (t)
1	3,53	4,2	3,54	4,91	1,43	0,85	2,0	20,5	0,0	3,9	13,4
2	3,53	11,3	3,6	11,32	3,28	1,96	2,0	20,5	0,3	8,1	16,3
3	3,53	19,2	3,74	19,06	5,53	3,3	2,0	20,5	4,8	9,1	18,1
4	3,53	30,4	4,1	25,53	7,4	4,42	2,0	20,5	7,1	10,3	21,9
5	3,53	42,4	4,78	25,52	7,4	4,41	2,0	20,5	5,4	8,9	27,3
6	3,53	40,2	4,63	30,67	8,89	5,31	2,0	20,5	7,9	11,8	28,0
7	3,53	34,5	4,29	31,98	9,27	5,53	2,0	20,5	8,1	14,1	26,3
8	3,53	37,9	4,48	22,79	6,61	3,94	2,0	20,5	7,5	5,8	22,1
9	3,53	40,1	4,62	16,22	4,7	2,81	2,0	20,5	3,8	2,7	21,0
10	3,53	44,5	4,95	7,11	2,06	1,23	2,0	20,5	0,0	-3,4	19,0

7.8.3. Análisis de estabilidad de taludes retrospectivo condición con sismo y nivel de aguas freáticas 100% de estratos blandos.

Fs= 0,51 Sep...3
 Fs= 0,71 Sep...3
 Fs= 1,30 Sep...1



Análisis de Estabilidad de Taludes con: JANBU (1967)

Cálculo realizado de acuerdo a	NTC 2008 & Circ.
Número de estratos	3,0
Número rebanadas	10,0
Grado de seguridad aceptable	1,3
Coefficiente parcial resistencia	1,0
Parámetros geotécnicos a usar. Ángulo de rozamiento interno:	Pico
Análisis	Condición drenada
Superficie de cualquier forma	

Coefficiente sísmico horizontal	0,29
Coefficiente sísmico vertical	0,173

Vértices perfil

Nr	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	1,73	1,0
3	4,17	2,0
4	6,14	3,0
5	7,61	4,0

Nr	X (m)	y (m)
6	8,85	5,0
7	10,51	6,0
8	12,29	6,96
9	14,05	8,0
10	15,75	9,0
11	16,72	10,0
12	17,8	11,0
13	19,11	12,0
14	20,52	13,0
15	21,93	14,0
16	23,04	15,0
17	23,9	16,0
18	24,77	17,0
19	25,64	18,0
20	26,51	19,0
21	27,42	20,0
22	28,39	21,0
23	29,8	22,0
24	31,3	23,0
25	31,82	23,1
26	32,41	23,11
27	33,1	23,0
28	33,8	22,83
29	34,82	22,82
30	35,62	23,0
31	36,65	24,0
32	38,18	25,0
33	39,13	26,0
34	50,0	26,0

Nivel freático

Nr.	X (m)	y (m)
1	0,19	-0,66
2	2,53	0,64
3	6,61	2,64
4	10,09	5,16
5	14,25	7,59
6	17,29	9,76
7	20,33	12,1
8	23,2	13,93
9	25,89	17,14
10	29,8	20,7
11	32,58	21,66
12	37,01	23,57
13	41,87	25,39
14	50,04	25,65

Vértices estrato.....1

N	X (m)	y (m)
1	0,0	-2,0
2	3,54	-0,67
3	9,46	2,35
4	14,48	5,52
5	18,54	7,86
6	20,4	9,65
7	22,6	11,02
8	23,7	12,81
9	26,04	14,81
10	30,58	18,11
11	33,13	20,45
12	35,53	21,41
13	38,77	22,92
14	50,0	23,35

Vértices estrato.....2

N	X (m)	y (m)
1	0,0	-3,25
2	3,2	-1,91
3	6,22	-0,81
4	10,21	1,18
5	13,31	2,77
6	15,99	4,97
7	19,23	6,21
8	23,22	8,54
9	25,01	10,82
10	27,0	12,67
11	30,03	14,81
12	33,33	17,21
13	36,57	18,04
14	39,39	19,14
15	50,0	19,37

Vértices superficie Nr...1

N	X m	y m
1	13,38	7,72
2	14,07	7,56
3	15,93	8,14
4	18,63	9,79
5	21,63	11,98
6	24,65	14,56
7	27,62	17,18
8	31,73	20,31
9	34,28	22,89

Vértices superficie Nr...2

N	X m	y m
1	10,22	5,94
2	11,51	5,7
3	15,51	6,68
4	18,81	8,3
5	23,24	11,54
6	27,35	15,11
7	35,57	23,03

Vértices superficie Nr...3

N	X m	y m
1	7,31	3,92
2	8,05	3,76
3	12,11	4,3
4	16,05	5,22
5	20,49	7,16
6	24,11	10,51
7	28,22	14,08
8	33,08	17,43
9	36,43	20,14
10	40,92	23,97
11	42,83	26,06

Coefficientes de acciones parciales

Desventajas: permanente, variable	1,0	1,0
Favorable: permanente, variable	1,0	1,0

Coefficientes parciales parámetros geotécnicos del terreno

Tangente ángulo de resistencia al corte	1,25
Cohesión efectiva	1,25
Cohesión no drenada	1,4
Reducción parámetros geotécnicos terreno	Si

Estratigrafía

Estrato	Cohesión (t/m ²)	Cohesión no drenada (t/m ²)	Ángulo de resistencia al corte (°)	Peso específico (t/m ³)	Peso saturado (t/m ³)	Litología	
1	4.5		25.75	1.16	1.660	DB LLENO	
2	4.5		25.75	1.16	1.660	DB CENIZA	
3	5.5		26.90	0.981	1.860	RESIDUAL	

Superficie Nr...1 Factor de seguridad=1,20

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (t)	Kh•Wi (t)	Kv•Wi (t)	c (t/m ²)	Fi (°)	Ui (t)	N'i (t)	Ti (t)
1	2,07	9,5	2,1	1,04	0,3	0,18	2,0	20,5	0,0	0,3	4,4
2	2,07	29,2	2,37	3,77	1,09	0,65	2,0	20,5	1,4	0,1	5,5
3	2,07	34,0	2,5	5,27	1,53	0,91	2,0	20,5	1,9	0,5	6,2
4	2,07	36,4	2,57	5,42	1,57	0,94	2,0	20,5	2,1	0,2	6,5
5	2,07	40,6	2,73	5,05	1,46	0,87	2,0	20,5	1,4	0,1	7,2
6	2,07	41,1	2,75	6,87	1,99	1,19	2,0	20,5	2,4	0,9	7,7
7	2,07	40,7	2,73	8,6	2,49	1,49	2,0	20,5	3,2	1,9	8,1
8	2,07	37,2	2,6	9,48	2,75	1,64	2,0	20,5	3,6	2,7	7,8
9	2,07	39,0	2,66	8,47	2,46	1,47	2,0	20,5	2,6	2,5	8,0
10	2,07	45,3	2,95	3,03	0,88	0,52	2,0	20,5	0,3	-1,5	7,6

Superficie Nr...2 Factor de seguridad=0,71

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (t)	Kh•Wi (t)	Kv•Wi (t)	c (t/m ²)	Fi (°)	Ui (t)	N'i (t)	Ti (t)
1	2,51	2,7	2,52	1,93	0,56	0,33	2,0	20,5	0,2	1,3	9,4
2	2,51	13,6	2,59	6,47	1,88	1,12	2,0	20,5	3,0	1,3	9,9
3	2,51	25,8	2,79	10,38	3,01	1,8	2,0	20,5	5,2	0,9	11,2
4	2,51	32,7	2,99	13,01	3,77	2,25	2,0	20,5	6,4	1,0	12,8
5	2,51	36,3	3,12	13,2	3,83	2,28	2,0	20,5	6,4	0,4	13,5
6	2,51	40,3	3,3	14,95	4,34	2,59	2,0	20,5	6,9	0,7	15,3
7	2,51	41,8	3,37	17,7	5,13	3,06	2,0	20,5	8,3	1,5	16,6
8	2,51	43,9	3,49	17,75	5,15	3,07	2,0	20,5	8,2	1,1	17,5
9	2,51	44,0	3,5	13,47	3,91	2,33	2,0	20,5	5,1	0,1	16,6
10	2,51	43,9	3,49	3,86	1,12	0,67	2,0	20,5	1,6	-5,1	12,0

Superficie Nr...3 Factor de seguridad=0,51

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (t)	Kh•Wi (t)	Kv•Wi (t)	c (t/m ²)	Fi (°)	Ui (t)	N'i (t)	Ti (t)
1	3,53	4,2	3,54	5,8	1,68	1,0	2,0	20,5	1,8	2,6	18,9
2	3,53	11,3	3,6	15,07	4,37	2,61	2,0	20,5	7,8	3,5	20,3
3	3,53	19,2	3,74	22,93	6,65	3,97	2,0	20,5	12,6	3,7	22,0
4	3,53	30,4	4,1	30,06	8,72	5,2	2,0	20,5	16,2	3,2	25,5
5	3,53	42,4	4,78	30,47	8,84	5,27	2,0	20,5	15,3	0,1	30,4
6	3,53	40,2	4,63	35,82	10,39	6,2	2,0	20,5	18,2	2,7	31,5
7	3,53	34,5	4,29	37,33	10,82	6,46	2,0	20,5	18,8	5,4	30,1
8	3,53	37,9	4,48	26,22	7,6	4,54	2,0	20,5	14,4	-0,8	25,7
9	3,53	40,1	4,62	19,08	5,53	3,3	2,0	20,5	9,5	-3,3	24,5
10	3,53	44,5	4,95	8,52	2,47	1,47	2,0	20,5	2,8	-8,0	22,8

7.8.4. Resultados análisis retrospectivo de estabilidad de taludes

A continuación, se presentan los resultados de las modelaciones de estabilidad para el análisis retrospectivo, dichas modelaciones se realizaron tomando la topografía del sector, la columna estratigráfica y las propiedades mecánicas de los materiales que conforman la zona de estudio, considerando tres escenarios (Naf=0%, Naf=50% y Naf=100% del estrato blando). Los valores obtenidos se comparan con los factores de seguridad recomendados en la tabla H.2.4-1 de la NSR-10 en donde el Factor de seguridad mínimo es 1.05 en condición dinámica.

Tabla 29. Resultados factor de seguridad mínimo análisis retrospectivo

Escenario analizado	Factor de seguridad mínimo
Sismo y Naf=0%	0.99
Sismo y Naf=50%	0.77
Sismo y Naf=100%	0.51

Los resultados de las modelaciones de estabilidad para el análisis retrospectivo, permiten evidenciar que bajo las características presentes en el sector y tomando los datos de la media para los parámetros como peso unitario, cohesión y ángulo de fricción, los valores obtenidos de los factores de seguridad son inferiores a los mínimos recomendados de la NSR-10 en donde el Factor de seguridad mínimo es 1.05 en condición dinámica,

8. Conclusiones

- A partir del estudio geológico de la comuna Universitaria se conocieron las formaciones superficiales predominantes en el sector, para el estudio se evidencia la presencia de depósitos de caída piroclástica de espesores variables, esta información es definida por autores como (Herrera & Picón, 2019), (Naranjo & Ríos, 1989) entre otros, como característica de la ciudad. Por otro lado, en la zona se encuentran depósitos de llenos antrópicos que han sido generados con el fin de construir zonas urbanizables y vías en la comuna. La información antes descrita se soporta a su vez en la prospección geotécnica recopilada y analizada en el presente trabajo, esta prospección permitió corroborar la presencia de dichas formaciones superficiales, para el área de estudio se encontraron depósitos blandos como ceniza volcánica y llenos antrópicos que presentan espesores que van desde 1.2 metros hasta 9.0 metros.
- El análisis de la prospección recopilada en la comuna Universitaria de la ciudad de Manizales permite evidenciar la variabilidad del nivel de aguas freáticas encontradas en las perforaciones, dado que en algunos casos no se evidencia nivel de aguas freáticas y en otros el nivel de aguas varía en la altura de los estratos, esta condición es de esperar debido a la toma de muestras en diferentes épocas del año y a su vez debido al régimen bimodal de la región.
- En el presente trabajo se determinó modelar tres escenarios para representar el comportamiento del nivel de aguas freáticas (NAF), sin embargo, es importante resaltar que se podría estimar de mejor forma el comportamiento e influencia del NAF para este tipo de modelaciones, si se incluye un análisis estadístico de esta variable, partiendo de técnicas precisas, una de ellas, la instalación de freatómetros en diferentes puntos de la zona de estudio, lo definido anteriormente permite la obtención de un análisis de la lluvia detallado y su influencia en la probabilidad de falla de taludes.

- Cuando se tienen problemas de estabilidad de taludes, independientemente del lugar en el que se encuentren, han predominado los métodos determinísticos sobre los probabilísticos para el análisis de factores de seguridad y determinación del grado de estabilidad, sin embargo, los estudios determinísticos enfocan el análisis de forma puntual, es decir, no tienen en cuenta la heterogeneidad o la basta variabilidad de datos que pueden darse en un lugar de estudio. Razón por la que este trabajo enmarca su enfoque en el análisis probabilístico del método de Monte Carlo para el cálculo de la probabilidad de falla y factores de seguridad, usando una distribución de densidad de probabilidad que se ajusta con mayor ajuste de las variables independientes del problema. Para el caso, en la teoría de talud infinito.
- El presente trabajo permite evidenciar la necesidad de incluir técnicas precisas que permitan conocer de forma global y eficiente el comportamiento de los taludes de la comuna Universitaria a partir de métodos probabilísticos que enmarcan los parámetros de manera más amplia y a su vez conocer los porcentajes de probabilidad de amenaza y factores de seguridad para diferentes escenarios.
- Teniendo en cuenta que existen distintos métodos probabilísticos tales como el método de primer orden segundo momento (FOSM) en donde a pesar de su bondad de ajuste se expresa como desventaja en algunos casos su grado de precisión, el método de estimativas puntuales en donde se tiene limitación en conocer el comportamiento de la función de densidad, lo anterior permite entender la razón de escogencia del método de Montecarlo en donde se permite una gran generación de datos aleatorios y la obtención de la función de densidad de probabilidad.

- En el presente estudio las variables analizadas corresponden a cohesión, ángulo de fricción, peso unitario húmedo y espesor del estrato blando (Lleno o ceniza). Lo primero que se debe señalar es que estas variables son continuas y los resultados analizados presentaron una amplia heterogeneidad en los resultados, esto se basa principalmente en los diferentes estados de consolidación de los depósitos de ceniza volcánica y la presencia de llenos antrópicos compuestos por diferentes tipos de suelo y conformados en una línea de tiempo variable. Por lo tanto, se concluye que la característica principal de estos datos, refleja la importancia de aplicar métodos que incluyan el análisis estadístico de las variables y su comportamiento en cuanto a distribución probabilística, con el fin de modelar la variación de cada escenario.
- El análisis estadístico de las variables arroja valores de tendencia central para los depósitos blandos y específicamente sus propiedades físicas y mecánicas como; peso unitario húmedo con valor medio de 1.66 gr/cm³, cohesión de 4.25 t/m² y ángulo de fricción de 25.75°. En lo relacionado con la dispersión de los datos se obtuvo el coeficiente de variación para el peso unitario de 0.09, cohesión 0.43 y ángulo de fricción 0.22, se evidencia que la cohesión es el parámetro con mayor dispersión dentro de los parámetros analizados, este resultado tiene relevancia en la definición de la distribución a la que se ajusta cada uno de los parámetros.
- Adicionalmente se calculó para cada uno de los parámetros el coeficiente de asimetría y sus resultados fueron analizados de acuerdo a lo expresado por (Joanes & Gill, 1998) en cuanto al ajuste de datos y su relación con la distribución de los mismos; Así para el peso unitario húmedo el coeficiente de asimetría es de -0.74, por lo que se define como simetría negativa, para el caso de la cohesión se obtuvo un resultado de 0.49 lo que indica una simetría positiva y para el ángulo de fricción se obtiene un coeficiente de asimetría de 0.00 lo que indica una distribución simétrica.

- La determinación de la distribución de probabilidad que siguen las variables, es parte fundamental para el análisis de la modelación de Montecarlo, por lo tanto con el fin de conocer el ajuste a distribuciones de las variables peso unitario húmedo, cohesión y ángulo de fricción se usó el método de máxima verosimilitud para determinar las distribuciones de probabilidad, realizado a través de la función de log-verosimilitud y estimadores por el método de máxima verosimilitud del software R., en el que se tiene que el menor error define el ajuste de la variable con la distribución correspondiente, evaluado para los test de Kolmogorov Smirnov y Cramér-von Mises, dicho método arroja que para las variables peso unitario, cohesión y ángulo de fricción la distribución que siguen las variables se ajusta a la distribución normal.
- Basado en la clasificación de amenaza en función de los factores de seguridad y probabilidad de falla propuestos por (Servicio Geológico Colombiano, 2017), Se definen los rangos de clasificación de los factores de seguridad como amenaza baja, media y alta, donde; la amenaza en función del factor de seguridad de un talud es alta cuando se tienen valores de FS menores a 1.1, media cuando los valores están dentro de un rango de 1.1 y 1.5, finalmente se definen como amenaza baja cuando el valor del factor de seguridad es mayor a 1.5. Una vez realizada la evaluación de Montecarlo para 5000 iteraciones, se identifica que características como el aumento de agua en el estrato de suelo potencialmente inestable, disminuye el valor de factor de seguridad, por ejemplo; para un talud sin agua el factor de seguridad es de 1.61 teniendo ángulos de inclinación de hasta 45° con alturas máximas de espesor del estrato de 3.0 metros. Esta situación cambia cuando el talud presenta nivel de aguas del 50% del espesor del estrato, ya que, para ángulos de hasta 45° el espesor del estrato solo podrá tener una altura máxima de 2.50 metros y el factor de seguridad corresponde a 1.76, el cual es definido como alto. Finalmente, para el talud saturado, con ángulo de inclinación de 45° y espesor del estrato de 2.50 metros se tiene un factor de seguridad de 1.63 el cual continúa dentro de la clasificación de factor de seguridad alto, pero con disminución del valor hallado para taludes medianamente saturados.

- Para la clasificación de las probabilidades de falla, se obtuvieron los rangos de clasificación definidos de acuerdo con lo descrito por el (Servicio Geológico Colombiano, 2017); en esta se categorizan como nivel de amenaza baja para probabilidades menores a 0.001, media cuando varían entre 0.001 y 0.16 y alta aquellas en las que se presentan probabilidades de falla mayores a 0.16. Las probabilidades de falla resultantes de la presente modelación permiten en primer lugar inferir que los análisis probabilísticos podrían conllevar a definir niveles de alerta temprana dado que, para estimación de probabilidad de falla, es más exigente que el simple cálculo del factor de seguridad, debido a que se pueden definir probabilidades de falla medias y altas incluso cuando se tienen factores de seguridad aceptables, lo anterior también ha sido concluido en diferentes estudios donde se incluye el concepto de probabilidad de falla en taludes por autores como (Christian et al., 1994), (El-Ramly et al., 2002), (Toro & Gonzales, 2012), entre otros.
- Las probabilidades de falla analizadas permiten concluir que los aumentos en el valor de variables tales como; presencia de agua en los taludes, ángulo de inclinación del estrato blando y altura de espesor del estrato blando, son determinantes en la ocurrencia de fallas planares, lo anterior se determina, dada la comparación del cálculo de probabilidades de falla encontrada a medida que se varían los escenarios, por ejemplo para taludes con saturación del 0% el ángulo de inclinación máximo para el rango de probabilidad de falla baja es de 5°, sin embargo, cuando el nivel de aguas freáticas asciende a la mitad del estrato, incluso con ángulos de inclinación bajos incluso de 5°, las probabilidades de falla estarán clasificadas como mínimo en probabilidades falla medias.
- Para el cálculo de probabilidades falla con condiciones críticas del nivel de aguas freáticas, permite determinar el aumento de probabilidades de falla alta, bajo condiciones que se consideran recurrentes y comunes para el sector, de acuerdo con lo hallado y analizado en la prospección geotécnica realizada, el tipo de relieve de la ciudad el aumento del nivel de aguas, por lo anterior se concluye que bajo condiciones límite las probabilidades de falla alta del sector representan más del 50% de resultados y que el valor de probabilidad de falla es del 97.8% en algunos casos.

- La determinación de la probabilidad de falla no determina completamente si un talud será susceptible a amenaza por deslizamiento, principalmente si se consideran los niveles de incertidumbre en los modelos y que el presente análisis parte de la escogencia de escenarios propuestos. Por esta razón se considera adecuado el uso de análisis retrospectivo, para la verificación de los datos de entrada en el método probabilístico, definido lo anterior se propuso un caso de estudio con el fin de llevar a cabo un análisis retrospectivo en un sector de la comuna Universitaria, para realizar el análisis de estabilidad de taludes se usó el software SLOPE de la firma GeoStru en su versión 2021.30.6.1458.

- El análisis retrospectivo se realiza para un sector que ya había presentado signos de inestabilidad en el año 2017. Dicho sector presenta pendientes definidas como altas, dentro de los rangos de clasificación en el análisis morfométrico de la comuna Universitaria, adicionalmente el talud analizado presenta estratos blando tipo llenos antrópico y ceniza volcánica de espesor promedio 5.5 metros. Adicionalmente para el análisis retrospectivo se usaron los datos de la media para las propiedades como peso unitario (γ), cohesión (c) y ángulo de fricción (ϕ) definidas en el análisis estadístico y usados también para el método de Montecarlo, los resultados del análisis retrospectivo permiten corroborar que:
 1. Para el escenario NAF del 0% se obtuvo por el análisis de estabilidad de Slope un FS de 0.99 lo cual representa un valor cercano a la probabilidad obtenida por el método de Montecarlo en donde para un escenario sin NAF, un espesor de 5.5 metros y una inclinación de 45° la probabilidad en función del Factor de seguridad es de 1.00.
 2. Para el escenario NAF del 50% se obtuvo por el análisis de estabilidad de Slope un FS de 0.77 lo cual representa un valor inferior en comparación con el obtenido por el método de Montecarlo en donde para un escenario con NAF del 50%, un espesor de 5.5 metros y una inclinación de 45° la probabilidad en función del Factor de seguridad es de 0.87, lo anterior permite concluir que el método probabilístico es conservador.

3. Para el escenario NAF del 100% se obtuvo por el análisis de estabilidad de Slope un FS de 0.51 lo cual representa un valor inferior en comparación con el obtenido por el método de Montecarlo en donde para un escenario con NAF del 100%, un espesor de 5.5 metros y una inclinación de 45° la probabilidad en función del Factor de seguridad es de 0.77. lo anterior permite concluir que el método probabilístico es conservador como se explica anteriormente.
 4. El presente estudio se basa en el planteamiento de distintos escenarios escogidos a partir del análisis de información existente del sector, de acuerdo con los escenarios escogidos lo resultados indican que el aumento de condiciones como altura del espesor del estrato blando, ángulo de inclinación y porcentajes del nivel de aguas freáticas, influyen en el aumento de la susceptibilidad de amenaza por deslizamiento y a su vez influye en la disminución del valor de factor de seguridad, dicho análisis es corroborado por medio del estudio de caso realizado a través del análisis retrospectivo.
- Los eventos ocurridos en la Comuna Universitaria, no solo los registrados en el presente documento, sino los ocurridos a través de los años en el sector y la ciudad, representan la importancia de la gestión del riesgo y el estudio de prevención temprana de desastres, lo anterior con el fin de evitar pérdidas irreparables que pueden ocurrir en periodos invernales de gran magnitud, que desencadenan movimientos planares.
 - La detección temprana de desastres en Ciudades como Manizales, en donde su condición de amenaza alta por movimientos sísmicos, su régimen de lluvias intensas en un periodo bimodal, suelos de procedencia volcánica y llenos antrópicos es necesaria para la gestión del riesgo de desastres. Este trabajo pretende aportar a partir de la recopilación de información geotécnica de 14 años, las características típicas del suelo y el cálculo de estabilidad de los taludes de la comuna generando escenarios probables, lo anterior permitió la generación de tablas de resultados del método probabilístico de Montecarlo desarrollado, que representan una herramienta para detección de condiciones que generan probabilidades de falla en la comuna Universitaria de la ciudad de Manizales.

9. Bibliografía

- Abreu, S. M. P., & Nicot, J. M., (2016). Actualización en la teoría de las probabilidades. Primera parte. Blog Silvia María Pozo Abreu, La Habana, Cuba. 2017, 1-15.
- Aguirre, M., & Gutierrez, J. C., (1992). Modelo tridimensional de las formaciones superficiales de Manizales. Tesis doctorado, Facultad de Ciencia Exactas y Naturales, Universidad de Caldas, 1-120.
- Alcántara Ayala, I. (2000). Landslides: deslizamientos o movimientos del terreno Definición, clasificaciones y terminología, Massachusetts, UEA. Investigaciones geográficas, (41), 7-25.
- Álvarez, A. J., (1983). Geología de la Cordillera Central y el Occidente colombiano y petroquímica de los intrusivos granitoides Mesocenoicos. Boletín Geológico, 26(2), 1-175.
- Alzate, L., (2019). Análisis de parámetros morfométricos, morfología fluvial y relación de la cobertura vegetal con los movimientos en masa de la cuenca del río Supía leidy. Manizales, Caldas, (vol. 87, volumen 1,2). Universidad de Cbaldas.
- Aparicio-ortubé, A., Camelo-espínosa, L. V., Henao-Yepes, C. M., Londoño-Luján, A. M., Salgado-correa, E. C., Sierra-Hernández, M. C., Vanegas-Chaverra, E. D., & Valencia-González, Y., (2019). Propuesta metodológica para la caracterización geotécnica de un suelo tropical derivado de rocas volcánicas Methodological proposal for the geotechnical characterization of a tropical soil derived from volcanic rocks. INGE CUC, 15(2), 56-65.
- Aristizábal, J. A., (2017). Correlación de las velocidades de onda y otros parámetros con las propiedades mecánicas de los suelos derivados de ceniza volcánica en la ciudad de Manizales. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingenieros Militares, 1-190.
- Aristizábal, J. A., & Mendoza, N. A., (2017). Obtención de propiedades mecánicas a partir de la relación V_p/V_s para depósitos superficiales de ceniza volcánica en Manizales Colombia. Revista ESPACIOS, 32-38.
- Arroyo, I., Bravo, L. C., Llinás, H., & Muñoz, F. L. (2014). Distribuciones Poisson y Gamma: Una discreta y continua relación. Prospectiva, 12(1), 99-107.
- Badillo, E. J., & Rodríguez, A. R., (1963). Mecánica de suelos tomo 1: Fundamentos de la mecánica de suelos. Rabasa, México, 1-493.
- Baecher, G., & Christian, J. (2003). Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering (1st ed.). New York: John Wiley & Sons, 593.

- Berlanga, V., & Rubio Hurtado, M. J., (2012). Clasificación de pruebas no paramétricas. Cómo aplicarlas en SPSS. REIRE. Revista d'Innovació i Recerca en Educació, 2012, vol. 5, num. 2, p. 101-113.
- Botero-Gómez, L. A., Osorio, P., Murcia, H., Borrero, C., & Grajales, J. A., (2018). Campo Volcánico Monogenético Villamaría-Termal, Cordillera Central, Andes colombianos (Parte I): Características morfológicas y relaciones temporales. Boletín de Geología, 40(3), 85–102p.
- Botero, G. A., & González, H., (1983). Algunas localidades fosilíferas cretáceas de la Cordillera Central. Antioquia y Caldas, Colombia: Geología Norandina, 7, 15.
- Canavos, G. C. (1988). Probabilidad y estadística. Aplicaciones y métodos. McGraw-Hill, Español, Naucalpan, México, 1-667..3
- Cai, J. S., Yan, E. C., Yeh, T. C. J., Zha, Y. Y., Liang, Y., Huang, S. Y., ... & Wen, J. C. (2017). Effect of spatial variability of shear strength on reliability of infinite slopes using analytical approach. Computers and Geotechnics, Arizona, USA, 81, 77-86.
- Christian, J. T., Ladd, C. C., & Baecher, G. B. (1994). Reliability applied to slope stability analysis. Journal of Geotechnical Engineering, 120(12), 2180-2207.
- Cho, S. E. (2007). Effects of spatial variability of soil properties on slope stability. Engineering Geology, 92(3-4), 97-109.
- Coney, P. J., Jones, D. L., & Monger, J. W. H., (1980). Cordilleran suspect terranes. Nature, 288(5789), 329–333.
- Corominas, J., Iglesias, R., Aguasca, A., Mallorqui, J. J., Fàbregas, X., Planas, X., & Gili, J. A., (2013). Consideraciones sobre el deslizamiento del Forn de Canillo (Principat d'Andorra) a partir de datos de Interferometría radar y nuevas observaciones. In Proc. 8th Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables (pp. 799-909).
- Coupé, F., (2011). La gestión del riesgo en el Valle de Aburrá. una larga historia. Gestión y Ambiente, 14(2), 17–44.
- Crespo-Villalaz, C., (2005). Mecánica de suelos y cimentaciones/Mechanics of Grounds and Laying of Foundations. Editorial Limusa, México, 15-650.

- Das, B. M., (2001). Fundamentos ingeniería cimentaciones (Cengage Le). Cengage Learning, México D.F,520- 816.
- Derek H.Cornforth.Ph.d, P. E., (2005). Landslide in Practice. Investigations, analysis and remedial/preventative options in soils, New Jersey, Canadá, 478–487.
- Dimitrova, D. S., Kaishev, V. K., & Tan, S., (2020). Computing the Kolmogórov-Smirnov Distribution When the Underlying CDF is Purely Discrete, Mixed, or Continuous. Journal of Statistical Software, 95(1), 1-42.
- Duncan, J. M., & Wrigth, S. G., (2005). Soil strength and slope stability, John Willey & Sons. Inc., Hoboken, New Jersey, 297.
- Ecos de la economía. Función Gamma. Tomado de: <http://ecosdelaeconomia.files.wordpress.com/2011/05/distribución-gamma.pdf>, (2013)
- El-Ramly, H., Morgenstern, N. R., & Cruden, D. M. (2002). Probabilistic slope stability analysis for practice. Canadian Geotechnical Journal, 39(3), 665-683.
- Escobar, C., & Duque, G., (2017). Geotecnia para el trópico andino. Universidad Nacional, Revista bdigital, Manizales Caldas, 634.
- Escalona, M. & Gómez, S.Z., (2012). Utilización de los métodos y técnicas estadísticas en las investigaciones de los procesos de postgrado. Didasc@lia: Didáctica y Educación, 3(6), 109-122.
- Faulín, J., & Juan, Á. A., (2005). Simulación de Monte Carlo con excel, Proyecto e-Math 1 Financiado por la Secretaría de Estado de Educación y Universidades (MECD).14
- Fernández, W., Villalobos, S., & King, R., (2018). Probabilistic analysis of slope stability in completely decomposed granite residual soils, Concepción, Chile. Revista ingeniería de construcción, 33(1), 5-14.
- Fernando Gomez Ledezma, Gabriel Rodriguez Roca, F. A. L. P., (1998). Simulación de Monte Carlo en Ingeniería Geotécnica, y su aplicación en el análisis de riesgos, Cajamarca 1–5.

- Florez, A., (1986). Geomorfología del área Manizales, Chinchiná, Cordillera Central, Colombia, Ministerio de Hacienda y Crédito Público- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Vol (9), Bogotá, 158.
- García López, M., Vallejo Monsalve, H., & Franco Latorre, R., (1991). Curso de actualización en estabilidad de taludes. Escuela Colombiana de ingeniería “Julio Garavito”. Bogotá, 95(4).
- Gerscovich, D. M., (2015). Estabilidad de Taludes. Oficina de textos; Traductor Manuel García López, Bogotá, Colombia. Biblioteca Digital de Bogotá, (10),1-199.
- Gómez Lera, S., & Alarcón Álvarez, E. (1992). Introducción a la fiabilidad estructural y algunas aplicaciones (No. 408). Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- González García, Á. J., (1983). Modos de falla planar de taludes secos cinemáticamente estables. Ingeniería e Investigación, Bogotá, Colombia, 22-33.
- Griffiths, D. V., & Fenton, G. A. (Eds.). (2007). Probabilistic methods in geotechnical engineering (Vol. 491). Springer Science & Business Media.
- Griffiths, D. V., Huang, J., & Dewolfe, G. F. (2011). Numerical and analytical observations on long and infinite slopes. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 35(5), 569-585
- Griffiths, D. V., & Lane, P. A. (1999). Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, 49(3), 387-403.
- Hansell, A., & Oppenheimer, C., (2004). Health hazards from volcanic gases: a systematic literature review. Archives of Environmental Health: An International Journal, 59(12), 628-639.
- Herrera, K., & Picón, K., (2019). Caracterización de depósitos de caída piroclástica: Dinámica eruptiva asociada a la actividad explosiva de tipo pliniana registrada en la ciudad de Manizales, Colombia. Tesis de Pregrado, Facultad de Fisicoquímicas. Universidad de Santander, 207.
- Highland, L. M., & Bobrowsky, P., (2008). Manual de derrumbes: Una guía para entender todo sobre los derrumbes. Reston, Virginia, EE. UU.: Sistema Geológico de los EUA, 1-176.

- Huang, Y. H., (1983). Stability analysis of earth slopes (V. N. R. COMPANY (ed.)). Springer Science & Business Media, New York, 13-25p.
- I Massons, J. M. D. (1970). Método gráfico basado en la prueba de Kolmogórov para la tipificación de tests, Barcelona, España. Anuario de psicología/The UB Journal of psychology, 29-44.
- Jiménez, C., (2017). Análisis de metodologías para la inclusión de parámetros hidrológicos en la estabilidad de taludes Análisis de metodologías para la inclusión de parámetros hidrológicos en la estabilidad de taludes. Tesis de Maestría, Área curricular de Ingeniería Civil y Agrícola. Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá. 185.
- Jiménez Salas, J. A., de Justo Alpañes, J. L., & Geotécnica y Cimientos, I. (1975). Propiedades de los suelos y de las rocas. Ed. Rueda, Madrid, 1-466.
- Joanes, D. N., & Gill, C. A., (1998). Comparing measures of sample skewness and kurtosis. Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician), 47(1), 183–189.
- Lacasse, S., & Nadim, F. (1997). Uncertainties in characterising soil properties. Publikasjon-Norges Geotekniske Institutt, Madison, WI. 201, 49-75.
- Lacasse, S., Nadim, F., Rahim, A., & Guttormsen, T. R. (2007, January). Statistical description of characteristic soil properties. In Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 1-9.
- Lavista, M. M., & Piusseaut, E. T., (2019). Análisis de la estabilidad de taludes en terraplenes mediante los métodos de equilibrio límite y el método de elementos finitos, La Habana, Cuba. Revista Cubana de Ingeniería,9(1), 49-56.
- Ledesma Villalba, A. (1987). Identificación de parámetros en geotecnia aplicación a la excavación de túneles. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Lizcano, A., Herrera, M. C., & Santamarina, J., (2006). Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia: Estudio fundamental e implicaciones en ingeniería. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, Bogotá, 6(2), 243.
- Lozano, H., Perez, H., & Vesga, C. J., (1984). Prospección geoquímica y génesis del mercurio en el flanco occidental de la cordillera Central de Colombia: municipios de Aránzazu, Salamina

- y Pacora, Departamento de Caldas. Boletín Geológico, 27(1), Bogotá, 77–169.
- Luis, J., & Henao, N. (2006). VIII Asamblea general ordinaria Acofacien, excursión al parque nacional natural los nevados. Universidad de caldas, Facultad de ciencias exactas y naturales, Manizales, Colombia, 1–34.
- de Manizales, A., (2017). Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Manizales 2017-2031. Exposición de motivos. Proyecto de acuerdo «por el cual se adopta la revisión ordinaria de contenidos de largo plazo del Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Manizales».
- Mantilla Blanco, P. L. (2016). Pruebas de bondad de ajuste y el problema de dos muestras en el contexto de Procesos de Poisson no homogéneos (Bachelor's thesis, Uniandes), Bogotá 1-66.
- Marinilli, A. (2011). Evaluación probabilística de la respuesta de sistemas lineales ante sollicitaciones sísmicas. Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela, 26(4), 29-37.
- Martínez-Cambor, P., Carleos, C., & Corral, N. (2012). Sobre el estadístico de Cramér-von Mises. Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones, 19(1), 89-101.
- Maia, J. A. C., & Assis, A. P. (2004). Etapas para estudios probabilísticos aplicados a geotecnia. Universidad de Brasília.
- Matteis, Á. F., (2003). Geología y Geotecnia Tema: Estabilidad de taludes. In Universidad Nacional de Rosario. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Rosario, Argentina, 42.
- Mergili, M., Marchant Santiago, C. I., & Moreiras, S. M. (2015). Causas, características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región Andina. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, 24(2), 113–131.
- Mendoza, J. M., & Domínguez, L., (2006). Estimación del peligro y el riesgo de deslizamientos en laderas. Guía Básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Riesgos. Fenómenos Geológicos. CENAPRED, México, DF, 1-74.
- Meyer, P. L. (1992). Probabilidad y aplicaciones estadísticas. (Ed. rev.). Adisson-Wesley Iberoamericana, Estados unidos, 480.

- Montoya, C. A. H., & de Assis, A. P., (2011). Herramientas para análisis por confiabilidad en geotecnia: La teoría. *Revista de Ingenierías: Universidad de Medellín*, 10(18), 69-78.
- Murcia, H., Borrero, C., & Németh, K., (2019). Overview and plumbing system implications of monogenetic volcanism in the northernmost Andes' volcanic province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 383, 77–87.
- Nadim, F., (2007). Tools and Strategies for Dealing with Uncertainty in Geotechnics,» en *Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering*, D. V. Griffiths y G. A. Fenton, eds., Nueva York: Springer, 2007. pp. 71-96.
- Naranjo, J. L., & Ríos, P. A., (1989). Geología de Manizales y sus alrededores y su influencia en los riesgos geológicos. *Revista Universidad de Caldas*, 10(1–3), 113.
- Narváez, L., Lavell, A., & Pérez, G., (2009). La gestión del riesgo de desastres. Secretaría General de la Comunidad Andina, San Isidro, Perú, (28), 1-104.
- Navidi, W., (2006). Estadística para ingenieros (Issue 519.5 N325). McGraw Hill Interamericana, México D.F, 859.
- Osorio, M. C., (2011). Modelación Numérica Y Física De La Estabilidad De Taludes Con Infiltración. Universidad De Los Andes Facultad De Ingeniería Departamento Civil Y Ambiental 2011,(99).
- Pachón G., J. A. (2011). Distribución de la lluvia en Manizales. *Boletín Ambiental. Instituto de Estudios Ambiental IDEA*, 93, 11.
- Phoon, K. K., & Kulhawy, F. H. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Canadian geotechnical journal*, 36(4), 612-624.
- Prada, F., Ramos, A., Solaque, D., & Caicedo, B. (2011). Confiabilidad aplicada al diseño geotécnico de un muro de contención. *Obras y proyectos*, (9), 49-58.
- Posse, F. J. A., (1987). Manual de ingeniería de taludes. Publicaciones del estudio geológico y minero de España N°3, Madrid, 451.
- Puy Santín, A. J., (2005). Influencia de la temperatura en el límite líquido para suelos con diferentes índices de plasticidad. Capítulo 1, 28.
- Reid, D., & Berry, P. L., (1993). Mecánica de suelos. Department of Civil Engineering University of Salford. Traducción Universidad Del Cauca. Colombia., 61–77.
- Ricardo, A., Sanz, V., Martí, S. S., & Orrego, A. D. (2015). Estabilidad de Taludes : Conceptos Básicos , Parámetros de Diseño y Métodos de Cálculo, Valencia, España,1-5.

- Rosanía Altahona, T. A., (2018). Efecto del avance del frente húmedo producto de la infiltración de lluvias simuladas en suelos tropicales, a través del diseño e implementación de un montaje en laboratorio. Tesis Magíster en Ingeniería – Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas Medellín, Colombia, 240.
- Rosenblueth, E. (1975). Point estimates for probability moments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 72(10), 3812-3814.
- Russelli, C., (2008). Probabilistic methods applied to the bearing capacity problem. (P. A. Vermeer, Ed.). Stuttgart: Institut für Geotechnik. P,1-165.
- Sánchez-Silva, M. (2010). Introducción a la confiabilidad y evaluación de riesgos: teoría y aplicaciones en ingeniería (Vol. 1). Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Bogotá, Colombia, 430.
- Sanhueza Plaza, C., & Rodríguez Cifuentes, L., (2013). Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales, Santiago Chile. *Revista de la Construcción*, 12(1), 17-29.
- Sepúlveda, A. (2011). Comportamiento sísmico de taludes de roca. Aplicación Del Método de Newmark. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 1-45.
- Servicio Geológico Colombiano. (2017). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, Colección guías y manuales Bogota, Colombia, 1-182.
- Skempton, A. W., & Hutchinson, J. (1969). Stability of natural slopes and embankment foundations. conference, The National academies of sciences engineering, Washington,DC, 291-340.
- Suarez-Burgoa, L. O. (2016). Análisis de estabilidad de taludes, con aplicaciones en MATLAB, Medellín, Colombia, 167.
- Suárez Díaz, J. (1998). Modelos de Análisis de Estabilidad 4.1. Deslizamientos y Estabilidad de Taludes En Zonas Tropicales, Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Bucaramanga, Colombia, 117–150.
- Suárez, J. (2009). Deslizamientos: Análisis Geotécnico. Capítulo 1 - Nomenclatura y Clasificación de los Movimientos. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Bucaramanga, Colombia., 36.
- Toro, L. J. E., & González, Y. V., (2012). Análisis de estabilidad y probabilidad de falla de dos taludes de suelo tropical en la autopista Medellín - Bogotá en el tramo de vía entre Marinilla y Santuario, Medellín, Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (31), 51-63.

USACE (1999), Risk – based analysis in geotechnical engineering for support of planning studies. ETL 1110–2–556.

Vargas Cuervo, G. (2000). Criterios para la clasificación y descripción de movimientos en masa, Bogotá, Colombia. Boletín de geología, 22(37).

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. Special Report, 176, 11–33.

Velásquez, S., & Velásquez, R. (2012). Modelado con variables aleatorias en simulink utilizando simulación montercarlo. Universidad, Ciencia y Tecnología, 16(64), 203-211.

Vivanco, M. (2005). Muestreo estadístico. Diseño y aplicaciones. Editorial universitaria, Santiago de Chile, 259.

Viviescas, J.C, & Osorio, J. P., (2017). Influencia geológica en los análisis de estabilidad de taludes por equilibrio límite, elementos finitos y elementos finitos aleatorios. Quinto Coloquio de Jóvenes Geotecnistas Segundo Encuentro de Profesores, Medellín, Colombia, 1-7.

Voss, J. (2014). An introduction to statistical computing: a simulation-based approach. John Wiley & Sons. United Kingdom, 379.

Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (1993). Probability and statistics for engineers and scientists (Vol. 5). New York: Macmillan.

En el sector de la carrilera (Manizales) colapsó una casa (1 de noviembre de 2017). La Patria. Recuperado de <http://www.lapatria.com/>

Ordenan evacuación de El Aguacate en Manizales (20 de abril de 2017). RCN Radio. Recuperado de <http://www.rcnradio.com/>

Deslizamiento afectó vía en el barrio Fátima (30 de septiembre de 2016). La Patria. Recuperado de <http://www.lapatria.com/>

Descripción y valoración de las inversiones en gestión de riesgos en Manizales (boletín informativo inversión gestión del riesgo Manizales). Recuperado de http://idea.manizales.unal.edu.co/gestion_riesgos/inversion.php

Avanzan obras de estabilidad en el barrio Kennedy (06 de septiembre de 2018). BC Noticias de Manizales, Caldas y Colombia. Recuperado de <http://www.bcnoticias.com.co/>

Al rededor de 400 habitantes de Pio XII y sector de Zafiro de Manizales participaron en Corpocaldas en tu barrio (18 de febrero de 2018) Eje 21. Recuperado de <http://www.eje21.com.co/>

Deslizamientos en Manizales dejan 14 muertos y 22 desaparecidos (19 de abril de 2017). El Espectador. Recuperado de <http://www.Elespectador.com.co/>

Deslizamientos en Manizales dejan 14 muertos y 22 desaparecidos (19 de abril de 2017). El Espectador. Recuperado de <http://www.Elespectador.com.co/>

Intervención presidente Juan Manuel Santos en Twitter por deslizamientos en Manizales (19 de abril de 2017). El universal. Recuperado de <http://www.eluniversal.com.co/>

Tras 6 meses, así se ven barrios de Manizales donde hubo derrumbes (19 de octubre de 2017). El Tiempo. Recuperado de <http://www.eltiempo.com/>

10.Anexos

10.1. Anexo función de probabilidad Normal y Log Normal

Tabla 30. Función de probabilidad Normal y Log Normal

Puntos	Valor	FDP NORMAL	FDP LOG NORMAL
0	1,109	0,004517173	0,00088298
1	1,11767	0,005514159	0,001209079
2	1,12634	0,006709817	0,001641266
3	1,13501	0,00813881	0,002209037
4	1,14368	0,009840791	0,002948513
5	1,15235	0,011860909	0,003903497
6	1,16102	0,014250326	0,005126584
7	1,16969	0,017066737	0,006680307
8	1,17836	0,020374878	0,008638289
9	1,18703		
		0,024247023	0,011086364
10	1,1957	0,028763431	0,01412362
11	1,20437	0,034012754	0,017863317
12	1,21304	0,040092374	0,022433622
13	1,22171	0,047108645	0,027978115
14	1,23038	0,055177028	0,034655985
15	1,23905	0,064422097	0,042641877
16	1,24772	0,074977381	0,05212532
17	1,25639	0,086985034	0,063309695
18	1,26506	0,100595294	0,076410696
19	1,27373	0,115965726	0,091654252
20	1,2824	0,133260211	0,109273894
21	1,29107	0,152647677	0,129507574
22	1,29974		
		0,174300552	0,152593935
23	1,30841	0,198392927	0,178768091
24	1,31708	0,225098429	0,208256951
25	1,32575	0,254587809	0,241274184
26	1,33442	0,28702624	0,278014897
27	1,34309	0,322570359	0,318650162
28	1,35176	0,361365071	0,363321494

Puntos	Valor	FDP NORMAL	FDP LOG NORMAL
29	1,36043	0,403540145	0,412135436
30	1,3691	0,449206652	0,465158385
31	1,37777	0,498453293	0,522411807
32	1,38644	0,551342688	0,583867994
33	1,39511	0,607907676	0,649446488
34	1,40378	0,668147726	0,719011313
35	1,41245	0,732025518	0,792369117
36	1,42112	0,799463803	0,86926832
37	1,42979	0,870342614	0,949399333
38	1,43846	0,944496928	1,032395889
39	1,44713	1,021714861	1,1178375
40	1,4558	1,10173648	1,205253029
41	1,46447	1,184253311	1,294125314
42	1,47314	1,26890861	1,383896798
43	1,48181	1,355298444	1,473976037
44	1,49048	1,442973627	1,563744981
45	1,49915	1,531442539	1,652566878
46	1,50782	1,620174818	1,739794648
47	1,51649	1,708605924	1,824779539
48	1,52516	1,796142531	1,906879912
49	1,53383	1,882168688	1,985469963
50	1,5425	1,966052679	2,059948201
51	1,55117	2,047154476	2,129745531
52	1,55984	2,124833666	2,19433277
53	1,56851	2,198457736	2,253227477
54	1,57718	2,267410545	2,305999947
55	1,58585	2,331100844	2,352278304
56	1,59452	2,388970682	2,391752591
57	1,60319	2,440503512	2,424177825
58	1,61186	2,485231861	2,449375972
59	1,62053	2,522744379	2,467236859
60	1,6292	2,552692135	2,477718026
61	1,63787	2,574794022	2,480843574
62	1,64654	2,588841147	2,476702061
63	1,65521	2,594700119	2,465443526
64	1,66388	2,59231516	2,447275733
65	1,67255	2,581708985	2,422459743
66	1,68122	2,562982445	2,391304915
67	1,68989	2,536312929	2,354163455
68	1,69856	2,501951566	2,311424634
69	1,70723	2,460219291	2,26350879

Puntos	Valor	FDP NORMAL	FDP LOG NORMAL
70	1,7159	2,411501851	2,21086122
71	1,72457	2,356243873	2,153946076
72	1,73324	2,294942114	2,093240369
73	1,74191	2,228138033	2,029228151
74	1,75058	2,156409849	1,962394988
75	1,75925	2,080364241	1,893222754
76	1,76792	2,00062786	1,82218484
77	1,77659	1,917838812	1,749741795
78	1,78526	1,832638276	1,676337447
79	1,79393	1,745662414	1,602395522
80	1,8026	1,657534697	1,528316771
81	1,81127	1,568858785	1,454476612
82	1,81994	1,48021206	1,381223265
83	1,82861	1,392139901	1,308876386
84	1,83728	1,305150767	1,23772615
85	1,84595	1,219712132	1,168032783
86	1,85462	1,136247296	1,100026484
87	1,86329	1,055133083	1,033907722
88	1,87196	0,976698401	0,969847851
89	1,88063	0,901223634	0,907990013
90	1,8893	0,828940819	0,848450291
91	1,89797	0,760034556	0,791319054
92	1,90664	0,694643554	0,73666248
93	1,91531	0,632862759	0,684524196
94	1,92398	0,574745962	0,634927012
95	1,93265	0,520308806	0,587874714
96	1,94132	0,469532093	0,543353885
97	1,94999	0,422365315	0,501335719
98	1,95866	0,378730316	0,461777826
99	1,96733	0,338525004	0,424625973
100	1,976	0,301627055	0,389815781

10.2. Bondad de ajuste Komogórov Smirnov peso unitario húmedo

Tabla 31. Bondad de ajuste Kolmogórov -Smirnov peso unitario húmedo.

n	Datos PUH	Frecuencia	Acumulada	Frecuencia acumulada (pi)	Zi	Distribución teórica f(x)	P(Zi-pi)	P(zi)-p-1)
1	1,109	1	1	0,01265823	-3,63	0,00014197	0,01251626	0,00014197
2	1,306	1	2	0,02531646	-2,32	0,01004007	0,01527639	0,00261816
3	1,321	1	3	0,03797468	-2,23	0,01302367	0,02495102	0,01229279
4	1,348	1	4	0,05063291	-2,05	0,02034425	0,03028866	0,01763043
5	1,41	1	5	0,06329114	-1,64	0,05091163	0,01237951	0,00027872
6	1,461	1	6	0,07594937	-1,30	0,09708934	0,02113998	0,0337982
7	1,47	1	7	0,08860759	-1,24	0,10772623	0,01911863	0,03177686
8	1,47	1	8	0,10126582	-1,24	0,10772623	0,00646041	0,01911863
9	1,472	1	9	0,11392405	-1,23	0,11019991	0,00372414	0,00893409
10	1,483	1	10	0,12658228	-1,15	0,1245342	0,00204808	0,01061015
11	1,493	1	11	0,13924051	-1,09	0,13865384	0,00058667	0,01207156
12	1,511	1	12	0,15189873	-0,97	0,16672771	0,01482898	0,0274872
13	1,513	1	13	0,16455696	-0,95	0,1700591	0,00550214	0,01816037
14	1,531	1	14	0,17721519	-0,83	0,20193721	0,02472202	0,03738025
15	1,537	1	15	0,18987342	-0,79	0,21331111	0,02343769	0,03609592
16	1,549	1	16	0,20253165	-0,72	0,23714647	0,03461482	0,04727305
17	1,556	1	17	0,21518987	-0,67	0,25169919	0,03650932	0,04916755
18	1,566	1	18	0,2278481	-0,60	0,27327949	0,04543139	0,05808961
19	1,573	1	19	0,24050633	-0,56	0,28891235	0,04840602	0,06106425
20	1,576	1	20	0,25316456	-0,54	0,2957386	0,04257404	0,05523227
21	1,589	1	21	0,26582278	-0,45	0,32613876	0,06031597	0,0729742
22	1,59	1	22	0,27848101	-0,44	0,32852935	0,05004834	0,06270656
23	1,599	1	23	0,29113924	-0,38	0,35035112	0,05921188	0,0718701
24	1,6	1	24	0,30379747	-0,38	0,35280819	0,04901072	0,06166895
25	1,603	1	25	0,3164557	-0,36	0,36021597	0,04376027	0,0564185
26	1,61	1	26	0,32911392	-0,31	0,37770186	0,04858794	0,06124617
27	1,611	1	27	0,34177215	-0,30	0,38022141	0,03844926	0,05110748
28	1,614	1	28	0,35443038	-0,29	0,38781019	0,03337981	0,04603804
29	1,625	1	29	0,36708861	-0,21	0,41598313	0,04889453	0,06155275
30	1,625	1	30	0,37974684	-0,21	0,41598313	0,0362363	0,04889453
31	1,626	1	31	0,39240506	-0,21	0,41856823	0,02616316	0,03882139
32	1,631	1	32	0,40506329	-0,17	0,43154434	0,02648104	0,03913927
33	1,634	1	33	0,41772152	-0,15	0,43936655	0,02164504	0,03430326
34	1,634	1	34	0,43037975	-0,15	0,43936655	0,00898681	0,02164504

n	Datos PUH	Frecuencia	Acumulada	Frecuencia acumulada (pi)	Zi	Distribución teórica f(x)	P(Zi-pi)	P(zi)-p-1)
35	1,634	1	35	0,44303797	-0,15	0,43936655	0,00367142	0,00898681
36	1,635	1	36	0,4556962	-0,15	0,44197939	0,01371682	0,00105859
37	1,655	1	37	0,46835443	-0,01	0,49461562	0,02626119	0,03891941
38	1,659	1	38	0,48101266	0,01	0,50518373	0,02417108	0,0368293
39	1,668	1	39	0,49367089	0,07	0,52893742	0,03526653	0,04792476
40	1,678	1	40	0,50632911	0,14	0,55520652	0,0488774	0,06153563
41	1,68	1	41	0,51898734	0,15	0,56043509	0,04144775	0,05410598
42	1,683	1	42	0,53164557	0,17	0,56825795	0,03661238	0,04927061
43	1,684	1	43	0,5443038	0,18	0,57085979	0,02655599	0,03921422
44	1,685	1	44	0,55696203	0,19	0,57345855	0,01649653	0,02915475
45	1,686	1	45	0,56962025	0,19	0,57605413	0,00643388	0,0190921
46	1,699	1	46	0,58227848	0,28	0,60945745	0,02717897	0,03983719
47	1,701	1	47	0,59493671	0,29	0,614532	0,01959529	0,03225352
48	1,701	1	48	0,60759494	0,29	0,614532	0,00693707	0,01959529
49	1,701	1	49	0,62025316	0,29	0,614532	0,00572116	0,00693707
50	1,714	1	50	0,63291139	0,38	0,64700494	0,01409355	0,02675178
51	1,719	1	51	0,64556962	0,41	0,65922936	0,01365974	0,02631797
52	1,729	1	52	0,65822785	0,48	0,68317245	0,0249446	0,03760283
53	1,732	1	53	0,67088608	0,50	0,69021397	0,0193279	0,03198613
54	1,732	1	54	0,6835443	0,50	0,69021397	0,00666967	0,0193279
55	1,733	1	55	0,69620253	0,50	0,69254589	0,00365664	0,00900159
56	1,733	1	56	0,70886076	0,50	0,69254589	0,01631487	0,00365664
57	1,738	1	57	0,72151899	0,54	0,70408763	0,01743136	0,00477313
58	1,743	1	58	0,73417722	0,57	0,71542627	0,01875095	0,00609272
59	1,748	1	59	0,74683544	0,60	0,72655317	0,02028227	0,00762404
60	1,751	1	60	0,75949367	0,62	0,73312432	0,02636935	0,01371112
61	1,755	1	61	0,7721519	0,65	0,74175999	0,03039191	0,01773368
62	1,759	1	62	0,78481013	0,68	0,75024851	0,03456161	0,02190339
63	1,766	1	63	0,79746835	0,72	0,76473945	0,0327289	0,02007068
64	1,777	1	64	0,81012658	0,79	0,78654256	0,02358402	0,01092579
65	1,786	1	65	0,82278481	0,85	0,80347162	0,01931319	0,00665497
66	1,789	1	66	0,83544304	0,87	0,80892872	0,02651432	0,01385609
67	1,796	1	67	0,84810127	0,92	0,82129587	0,0268054	0,01414717
68	1,801	1	68	0,86075949	0,95	0,82981355	0,03094594	0,01828771
69	1,814	1	69	0,87341772	1,04	0,85071965	0,02269807	0,01003985
70	1,82	1	70	0,88607595	1,08	0,85976442	0,02631153	0,0136533
71	1,84	1	71	0,89873418	1,21	0,88718966	0,01154452	0,00111371
72	1,845	1	72	0,91139241	1,24	0,89340306	0,01798934	0,00533111
73	1,856	1	73	0,92405063	1,32	0,90619487	0,01785576	0,00519754
74	1,861	1	74	0,93670886	1,35	0,91161952	0,02508934	0,01243111
75	1,877	1	75	0,94936709	1,46	0,92740867	0,02195842	0,00930019

n	Datos PUH	Frecuencia	Acumulada	Frecuencia acumulada (pi)	Zi	Distribución teórica f(x)	P(Zi-pi)	P(zi)-p-1)
76	1,889	1	76	0,96202532	1,54	0,93775941	0,0242659	0,01160767
77	1,89	1	77	0,97468354	1,54	0,93856715	0,03611639	0,02345817
78	1,942	1	78	0,98734177	1,89	0,97043601	0,01690576	0,00424753
79	1,976	1	79	1	2,11	0,98267457	0,01732543	0,0046672

10.3. Bondad de ajuste Komogórov Smirnov cohesión

Tabla 32. Bondad de ajuste Kolmogórov -Smirnov cohesión

n	Datos C	Frecuencia	Acumulada	Frecuencia acumulada (pi)	Zi	Distribución teórica f(x)	P(Zi-pi)	P(zi)-p-1)
1	0,83	1	1	0,012658228	-1,87	0,030403605	0,017745	0,030404
2	1,2	1	2	0,025316456	-1,67	0,047273016	0,021957	0,047273
3	1,2	1	3	0,037974684	-1,67	0,047273016	0,009298	0,047273
4	1,5	1	4	0,050632911	-1,51	0,065867985	0,015235	0,065868
5	1,6	1	5	0,063291139	-1,45	0,073191695	0,009901	0,073192
6	1,9	1	6	0,075949367	-1,29	0,098903129	0,022954	0,098903
7	1,9	1	7	0,088607595	-1,29	0,098903129	0,010296	0,098903
8	2,0	1	8	0,101265823	-1,23	0,108795223	0,007529	0,108795
9	2,0	1	9	0,113924051	-1,23	0,108795223	0,005129	0,108795
10	2,1	1	10	0,126582278	-1,18	0,119379469	0,007203	0,119379
11	2,1	1	11	0,139240506	-1,18	0,119379469	0,019861	0,119379
12	2,3	1	12	0,151898734	-1,07	0,142678586	0,00922	0,142679
13	2,5	1	13	0,164556962	-0,96	0,168872623	0,004316	0,168873
14	2,5	1	14	0,17721519	-0,96	0,168872623	0,008343	0,168873
15	2,6	1	15	0,189873418	-0,90	0,183060357	0,006813	0,18306
16	2,7	1	16	0,202531646	-0,85	0,197969154	0,004562	0,197969
17	2,8	1	17	0,215189873	-0,79	0,213588581	0,001601	0,213589
18	2,8	1	18	0,227848101	-0,79	0,213588581	0,01426	0,213589
19	2,9	1	19	0,240506329	-0,74	0,229903338	0,010603	0,229903
20	2,9	1	20	0,253164557	-0,74	0,229903338	0,023261	0,229903
21	3,0	1	21	0,265822785	-0,68	0,246893169	0,01893	0,246893
22	3,0	1	22	0,278481013	-0,68	0,246893169	0,031588	0,246893
23	3,0	1	23	0,291139241	-0,68	0,246893169	0,044246	0,246893
24	3,0	1	24	0,303797468	-0,68	0,246893169	0,056904	0,246893
25	3,0	1	25	0,316455696	-0,68	0,246893169	0,069563	0,246893
26	3,4	1	26	0,329113924	-0,46	0,321025015	0,008089	0,321025
27	3,4	1	27	0,341772152	-0,46	0,321025015	0,020747	0,321025
28	3,4	1	28	0,35443038	-0,46	0,321025015	0,033405	0,321025
29	3,5	1	29	0,367088608	-0,41	0,340914611	0,026174	0,340915
30	3,5	1	30	0,379746835	-0,41	0,340914611	0,038832	0,340915
31	3,5	1	31	0,392405063	-0,41	0,340914611	0,05149	0,340915
32	3,5	1	32	0,405063291	-0,41	0,340914611	0,064149	0,340915
33	3,6	1	33	0,417721519	-0,36	0,361256547	0,056465	0,361257
34	3,8	1	34	0,430379747	-0,25	0,403085057	0,027295	0,403085
35	3,9	1	35	0,443037975	-0,19	0,424457247	0,018581	0,424457
36	4,0	1	36	0,455696203	-0,14	0,446053938	0,009642	0,446054
37	4,0	1	37	0,46835443	-0,14	0,446053938	0,0223	0,446054
38	4,0	1	38	0,481012658	-0,14	0,446053938	0,034959	0,446054
39	4,0	1	39	0,493670886	-0,14	0,446053938	0,047617	0,446054

n	Datos C	Frecuencia	Acumulada	Frecuencia acumulada (pi)	Zi	Distribución teórica f(x)	P(Zi-pi)	P(zi)-p-1)
40	4,0	1	40	0,506329114	-0,14	0,446053938	0,060275	0,446054
41	4,1	1	41	0,518987342	-0,08	0,467811909	0,051175	0,467812
42	4,1	1	42	0,53164557	-0,08	0,467811909	0,063834	0,467812
43	4,2	1	43	0,544303797	-0,03	0,489666492	0,054637	0,489666
44	4,2	1	44	0,556962025	-0,03	0,489666492	0,067296	0,489666
45	4,2	1	45	0,569620253	-0,03	0,489666492	0,079954	0,489666
46	4,3	1	46	0,582278481	0,03	0,511552152	0,070726	0,511552
47	4,3	1	47	0,594936709	0,03	0,511552152	0,083385	0,511552
48	4,4	1	48	0,607594937	0,08	0,533403072	0,074192	0,533403
49	4,5	1	49	0,620253165	0,14	0,555153749	0,065099	0,555154
50	4,5	1	50	0,632911392	0,14	0,555153749	0,077758	0,555154
51	4,8	1	51	0,64556962	0,30	0,619166249	0,026403	0,619166
52	4,9	1	52	0,658227848	0,36	0,639887443	0,01834	0,639887
53	5,0	1	53	0,670886076	0,41	0,660205524	0,010681	0,660206
54	5,0	1	54	0,683544304	0,41	0,660205524	0,023339	0,660206
55	5,0	1	55	0,696202532	0,41	0,660205524	0,035997	0,660206
56	5,0	1	56	0,708860759	0,41	0,660205524	0,048655	0,660206
57	5,2	1	57	0,721518987	0,52	0,699428117	0,022091	0,699428
58	5,3	1	58	0,734177215	0,58	0,718240522	0,015937	0,718241
59	5,5	1	59	0,746835443	0,69	0,754070445	0,007235	0,75407
60	5,5	1	60	0,759493671	0,69	0,754070445	0,005423	0,75407
61	5,6	1	61	0,772151899	0,74	0,771023294	0,001129	0,771023
62	5,9	1	62	0,784810127	0,91	0,817748881	0,032939	0,817749
63	6,0	1	63	0,797468354	0,96	0,831896244	0,034428	0,831896
64	6,1	1	64	0,810126582	1,02	0,845316666	0,03519	0,845317
65	6,1	1	65	0,82278481	1,02	0,845316666	0,022532	0,845317
66	6,1	1	66	0,835443038	1,02	0,845316666	0,009874	0,845317
67	6,1	1	67	0,848101266	1,02	0,845316666	0,002785	0,845317
68	6,2	1	68	0,860759494	1,07	0,858009241	0,00275	0,858009
69	6,3	1	69	0,873417722	1,13	0,869977372	0,00344	0,869977
70	6,4	1	70	0,886075949	1,18	0,881228495	0,004847	0,881228
71	6,5	1	71	0,898734177	1,24	0,891773782	0,00696	0,891774
72	6,7	1	72	0,911392405	1,35	0,910808229	0,000584	0,910808
73	6,8	1	73	0,924050633	1,40	0,919335378	0,004715	0,919335
74	7,4	1	74	0,936708861	1,73	0,958168057	0,021459	0,958168
75	7,5	1	75	0,949367089	1,78	0,962843225	0,013476	0,962843
76	7,5	1	76	0,962025316	1,78	0,962843225	0,000818	0,962843
77	7,7	1	77	0,974683544	1,89	0,970914721	0,003769	0,970915
78	8,0	1	78	0,987341772	2,06	0,980253305	0,007088	0,980253
79	9,8	1	79	1	3,05	0,998842772	0,001157	0,998843

10.4. Bondad de ajuste Komogórov Smirnov ángulo de fricción

Tabla 33. Bondad de ajuste Kolmogórov -Smirnov ángulo de fricción

n	Datos PUH	Frecuencia	Acumulada	Frecuencia acumulada (π_i)	Zi	Distribución teórica f(x)	P(Zi- π_i)	P(zi)-p-1)
1	13,75	1	1	0,012658228	2,07	0,019130538	0,006472311	0,019130538
2	14,05	1	2	0,025316456	2,02	0,021679298	0,003637158	0,021679298
3	14,98	1	3	0,037974684	1,86	0,031468584	0,0065061	0,031468584
4	15,20	1	4	0,050632911	1,82	0,034254603	0,016378309	0,034254603
5	15,37	1	5	0,063291139	1,79	0,036543657	0,026747482	0,036543657
6	16,95	1	6	0,075949367	1,52	0,064327017	0,01162235	0,064327017
7	18,12	1	7	0,088607595	1,32	0,093855491	0,005247896	0,093855491
8	18,5	1	8	0,101265823	1,25	0,10532907	0,004063248	0,10532907
9	18,51	1	9	0,113924051	1,25	0,105644139	0,008279912	0,105644139
10	18,52	1	10	0,126582278	1,25	0,105959888	0,02062239	0,105959888
11	19,53	1	11	0,139240506	1,07	0,141437209	0,002196702	0,141437209
12	19,78	1	12	0,151898734	1,03	0,151338072	0,000560662	0,151338072
13	19,8	1	13	0,164556962	1,03	0,152149586	0,012407376	0,152149586
14	20,26	1	14	0,17721519	0,95	0,171610777	0,005604413	0,171610777
15	20,48	1	15	0,189873418	0,91	0,181456937	0,008416481	0,181456937
16	20,57	1	16	0,202531646	0,89	0,185584858	0,016946787	0,185584858
17	21,06	1	17	0,215189873	0,81	0,209066323	0,006123551	0,209066323
18	21,18	1	18	0,227848101	0,79	0,215072932	0,012775169	0,215072932
19	21,34	1	19	0,240506329	0,76	0,223235581	0,017270748	0,223235581
20	22,15	1	20	0,253164557	0,62	0,267158232	0,013993675	0,267158232
21	22,2	1	21	0,265822785	0,61	0,270005685	0,004182901	0,270005685
22	22,25	1	22	0,278481013	0,60	0,272868245	0,005612767	0,272868245
23	22,27	1	23	0,291139241	0,60	0,274017469	0,017121771	0,274017469

n	Datos PUH	Frecuencia	Acumulada	Frecuencia acumulada (pi)	Zi	Distribución teórica f(x)	P(Zi-pi)	P(zi)-p-1)
24	22,46	1	24	0,303797468	0,57	0,285052874	0,018744595	0,285052874
25	22,79	1	25	0,316455696	0,51	0,304707997	0,011747699	0,304707997
26	22,81	1	26	0,329113924	0,51	0,305918357	0,023195567	0,305918357
27	23,17	1	27	0,341772152	0,45	0,328057213	0,013714939	0,328057213
28	23,22	1	28	0,35443038	0,44	0,331182771	0,023247608	0,331182771
29	23,23	1	29	0,367088608	0,43	0,331809306	0,035279302	0,331809306
30	23,23	1	30	0,379746835	0,43	0,331809306	0,04793753	0,331809306
31	23,25	1	31	0,392405063	0,43	0,333063786	0,059341278	0,333063786
32	23,31	1	32	0,405063291	0,42	0,336838401	0,06822489	0,336838401
33	23,51	1	33	0,417721519	0,39	0,34953776	0,068183759	0,34953776
34	23,59	1	34	0,430379747	0,37	0,354666023	0,075713724	0,354666023
35	24,19	1	35	0,443037975	0,27	0,393911795	0,049126179	0,393911795
36	24,81	1	36	0,455696203	0,16	0,435625931	0,020070272	0,435625931
37	25,19	1	37	0,46835443	0,10	0,461583402	0,006771029	0,461583402
38	25,37	1	38	0,481012658	0,07	0,473943365	0,007069293	0,473943365
39	25,44	1	39	0,493670886	0,05	0,478757461	0,014913425	0,478757461
40	25,58	1	40	0,506329114	0,03	0,488394254	0,01793486	0,488394254
41	25,88	1	41	0,518987342	0,02	0,509060131	0,009927211	0,509060131
42	26,05	1	42	0,53164557	0,05	0,52076356	0,01088201	0,52076356
43	26,33	1	43	0,544303797	0,10	0,539996112	0,004307686	0,539996112
44	26,34	1	44	0,556962025	0,10	0,54068153	0,016280495	0,54068153
45	26,80	1	45	0,569620253	0,18	0,572047502	0,002427249	0,572047502
46	26,80	1	46	0,582278481	0,18	0,572047502	0,010230979	0,572047502
47	27,28	1	47	0,594936709	0,26	0,60429563	0,009358921	0,60429563
48	27,46	1	48	0,607594937	0,30	0,616219369	0,008624432	0,616219369
49	27,46	1	49	0,620253165	0,30	0,616219369	0,004033795	0,616219369
50	28	1	50	0,632911392	0,39	0,65129545	0,018384058	0,65129545
51	28,04	1	51	0,64556962	0,40	0,653847142	0,008277522	0,653847142
52	28,04	1	52	0,658227848	0,40	0,653847142	0,004380706	0,653847142
53	28,37	1	53	0,670886076	0,45	0,674623543	0,003737467	0,674623543
54	28,37	1	54	0,683544304	0,45	0,674623543	0,008920761	0,674623543
55	28,39	1	55	0,696202532	0,46	0,675866248	0,020336284	0,675866248
56	28,6	1	56	0,708860759	0,49	0,688794328	0,020066431	0,688794328
57	29,02	1	57	0,721518987	0,56	0,713951743	0,007567245	0,713951743
58	29,32	1	58	0,734177215	0,62	0,731308191	0,002869025	0,731308191

n	Datos PUH	Frecuencia	Acumulada	Frecuencia acumulada (pi)	Zi	Distribución teórica f(x)	P(Zi-pi)	P(zi)-p-1)
59	29,53	1	59	0,746835443	0,65	0,743134654	0,003700789	0,743134654
60	30,06	1	60	0,759493671	0,74	0,77173314	0,012239469	0,77173314
61	30,24	1	61	0,772151899	0,78	0,781022553	0,008870654	0,781022553
62	30,57	1	62	0,784810127	0,83	0,797476051	0,012665924	0,797476051
63	30,87	1	63	0,797468354	0,88	0,811772666	0,014304311	0,811772666
64	31,42	1	64	0,810126582	0,98	0,836315819	0,026189237	0,836315819
65	32,40	1	65	0,82278481	1,15	0,874653331	0,051868521	0,874653331
66	32,62	1	66	0,835443038	1,19	0,88231898	0,046875942	0,88231898
67	32,62	1	67	0,848101266	1,19	0,88231898	0,034217714	0,88231898
68	33,09	1	68	0,860759494	1,27	0,897569725	0,036810232	0,897569725
69	33,42	1	69	0,873417722	1,32	0,907383447	0,033965725	0,907383447
70	33,42	1	70	0,886075949	1,32	0,907383447	0,021307498	0,907383447
71	33,57	1	71	0,898734177	1,35	0,911606963	0,012872785	0,911606963
72	33,57	1	72	0,911392405	1,35	0,911606963	0,000214558	0,911606963
73	33,81	1	73	0,924050633	1,39	0,91806352	0,005987113	0,91806352
74	34,24	1	74	0,936708861	1,47	0,928733188	0,007975673	0,928733188
75	34,99	1	75	0,949367089	1,60	0,944748943	0,004618146	0,944748943
76	35,14	1	76	0,962025316	1,62	0,947581644	0,014443672	0,947581644
77	35,50	1	77	0,974683544	1,68	0,953910468	0,020773076	0,953910468
78	36,00	1	78	0,987341772	1,77	0,96166638	0,025675392	0,96166638
79	38,53	1	79	1	2,21	0,986352452	0,013647548	0,986352452

10.5. Anexo síntesis método de Montecarlo 5000 iteraciones altura de agua del 0%.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 1.0 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 34) se obtiene F.S. mínimo de 2. y máximo de 4.20. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 0.95% y 3.12%.

Tabla 34. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=1.0m

β	FS MEDIO	PF
5,00	8,11	0,95%
10,00	6,67	1,19%
15,00	5,74	1,48%
20,00	5,11	1,80%
25,00	4,69	2,13%
30,00	4,41	2,46%
35,00	4,26	2,75%
40,00	4,20	2,98%
45,00	4,25	3,12%

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 1.5 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 35) se obtiene F.S. mínimo de 2.95 y máximo de 5.90. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 0.82% y 4.64%.

Tabla 35. Resúmenes resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=1.5m$

β	FS MEDIO	PF
5,00	5,90	0,82%
10,00	4,84	1,16%
15,00	4,15	1,59%
20,00	3,68	2,12%
25,00	3,36	2,70%
30,00	3,14	3,31%
35,00	3,01	3,88%
40,00	2,95	4,35%
45,00	2,96	4,64%

A continuación se presenta la (Gráfica 56) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación para z de 1.5m, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que no se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

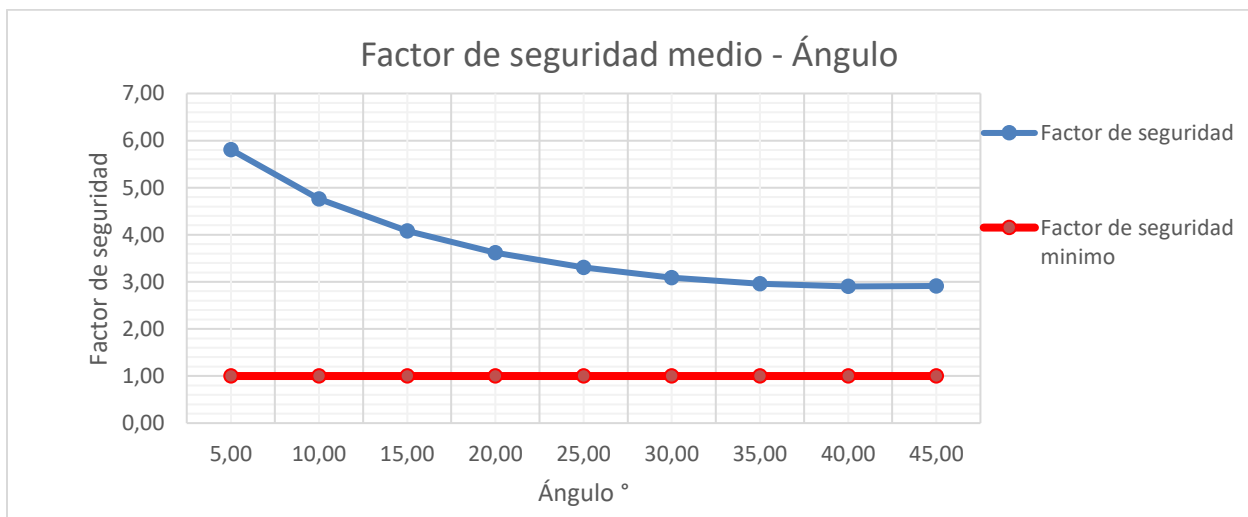


Figura 56. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 57), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando.

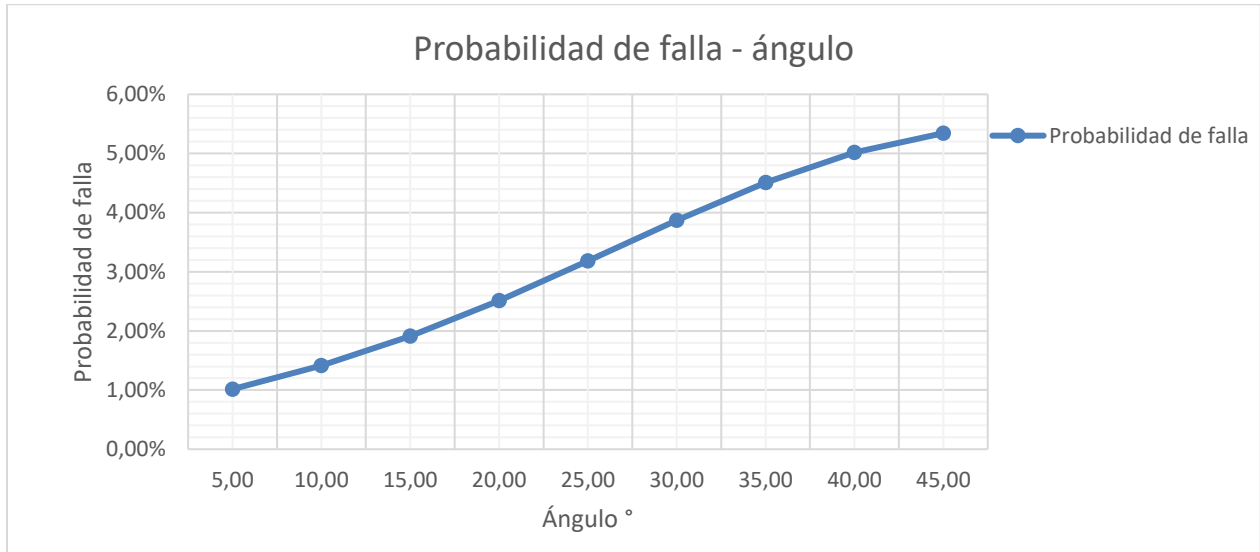


Figura 57. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 2.0m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 36) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 2.27 y máximo de 4,69. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 0.89% y 7.63%.

Tabla 36. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=2.0m

β	FS MEDIO	PF
5,00	4,69	0,89%
10,00	3,84	1,38%
15,00	3,28	2,06%
20,00	2,90	2,94%
25,00	2,63	3,98%
30,00	2,45	5,09%
35,00	2,33	6,17%
40,00	2,27	7,06%
45,00	2,27	7,63%

Se presenta la (Gráfica 58) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que no se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

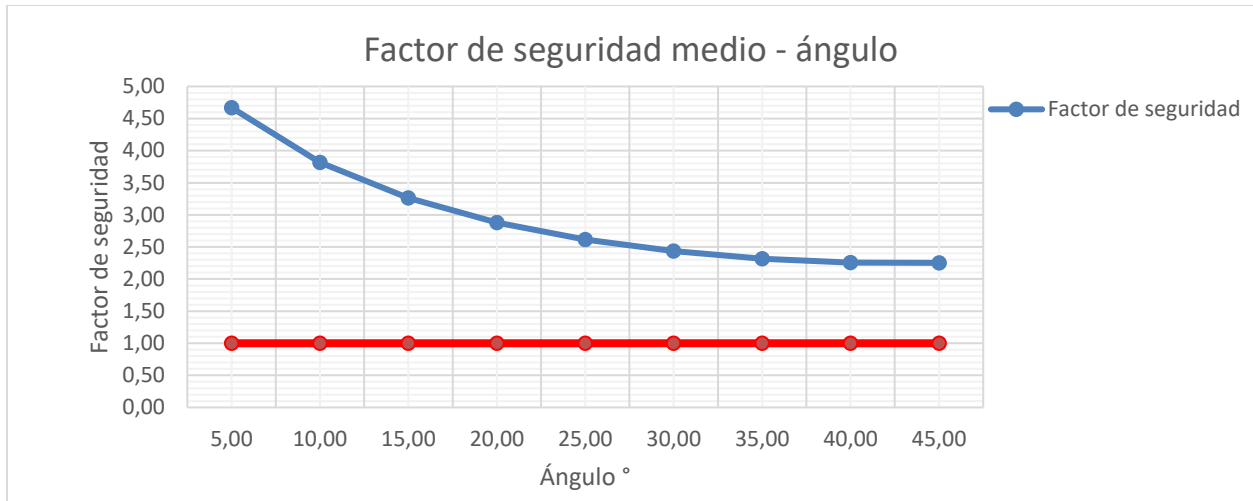


Figura 58. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 59), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando.

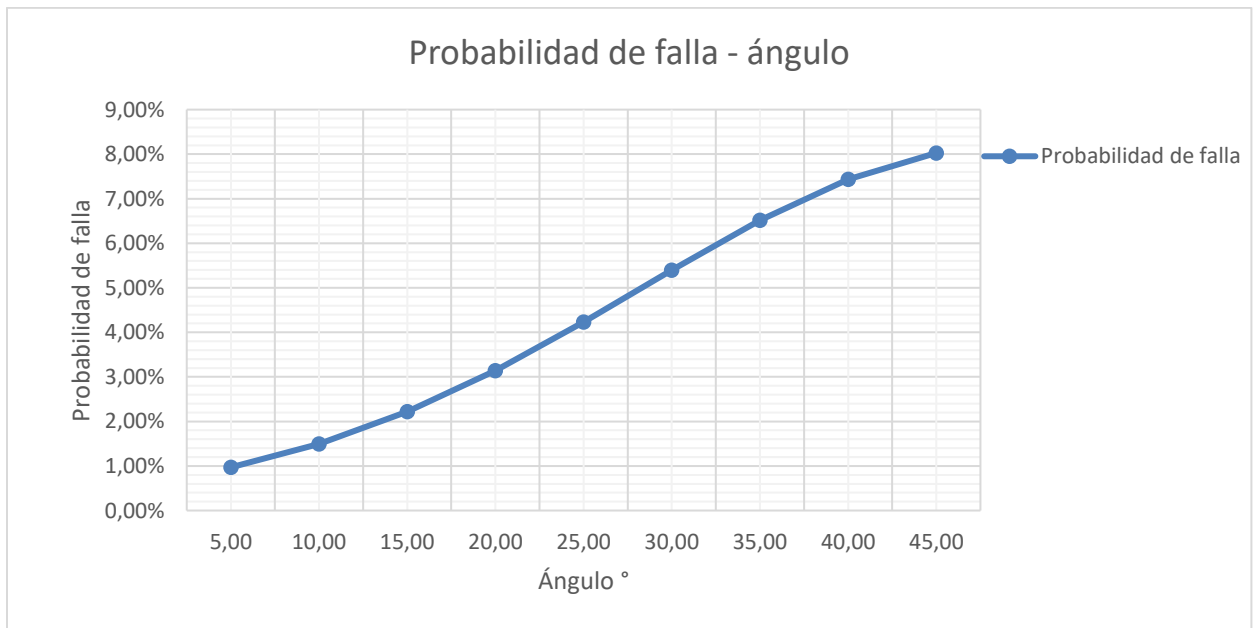


Figura 59. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 2.5m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 37) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 1.86 y máximo de 4.00. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 0.90% y 11,36%.

Tabla 37. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=2.5m

β	FS MEDIO	PF
5,00	4,00	0,90%
10,00	3,27	1,53%
15,00	2,78	2,48%
20,00	2,45	3,77%
25,00	2,21	5,37%
30,00	2,05	7,16%
35,00	1,94	8,92%
40,00	1,88	10,40%
45,00	1,86	11,36%

Se presenta la (Gráfica 60) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que no se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

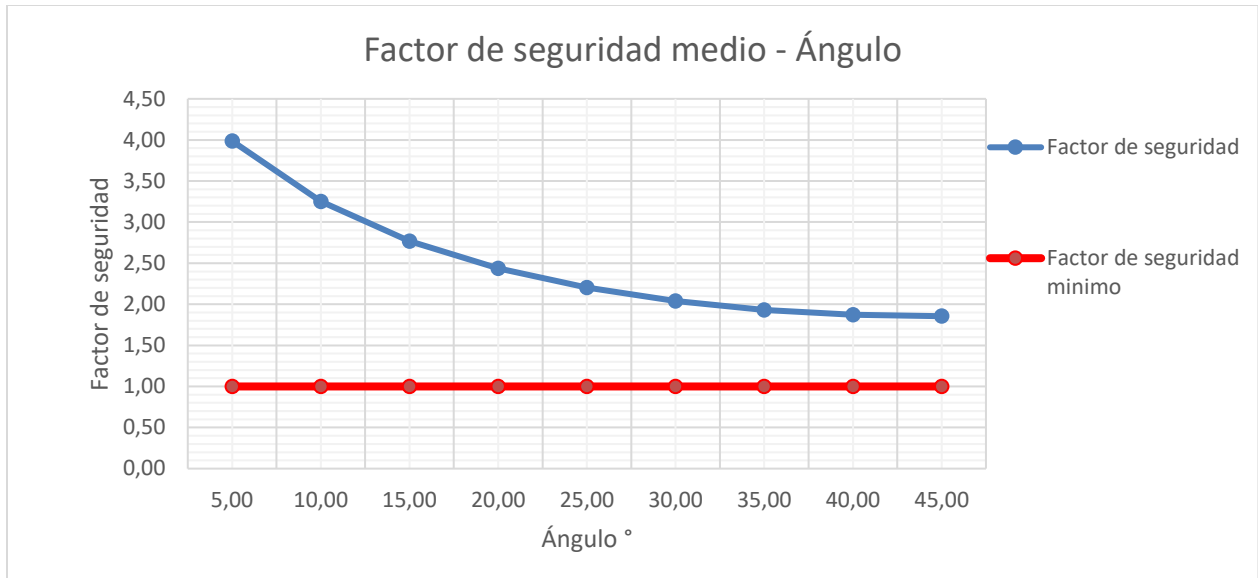


Figura 60. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 61), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando.

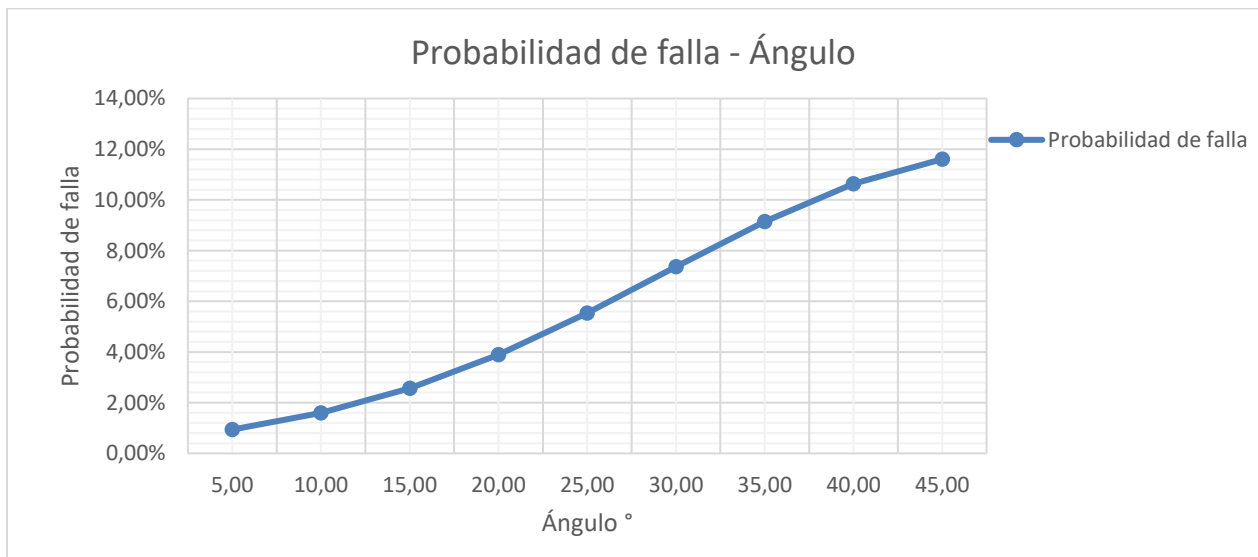


Figura 61. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 3.0m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 38) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 1.61 y máximo de 3,57. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 0.72% y 14,91%.

Tabla 38. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=3.0m

β	FS MEDIO	PF
5,00	3,57	0,72%
10,00	2,91	1,39%
15,00	2,47	2,49%
20,00	2,16	4,12%
25,00	1,95	6,27%
30,00	1,80	8,77%
35,00	1,69	11,30%
40,00	1,63	13,47%
45,00	1,61	14,91%

Se presenta la (Gráfica 62) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que no se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

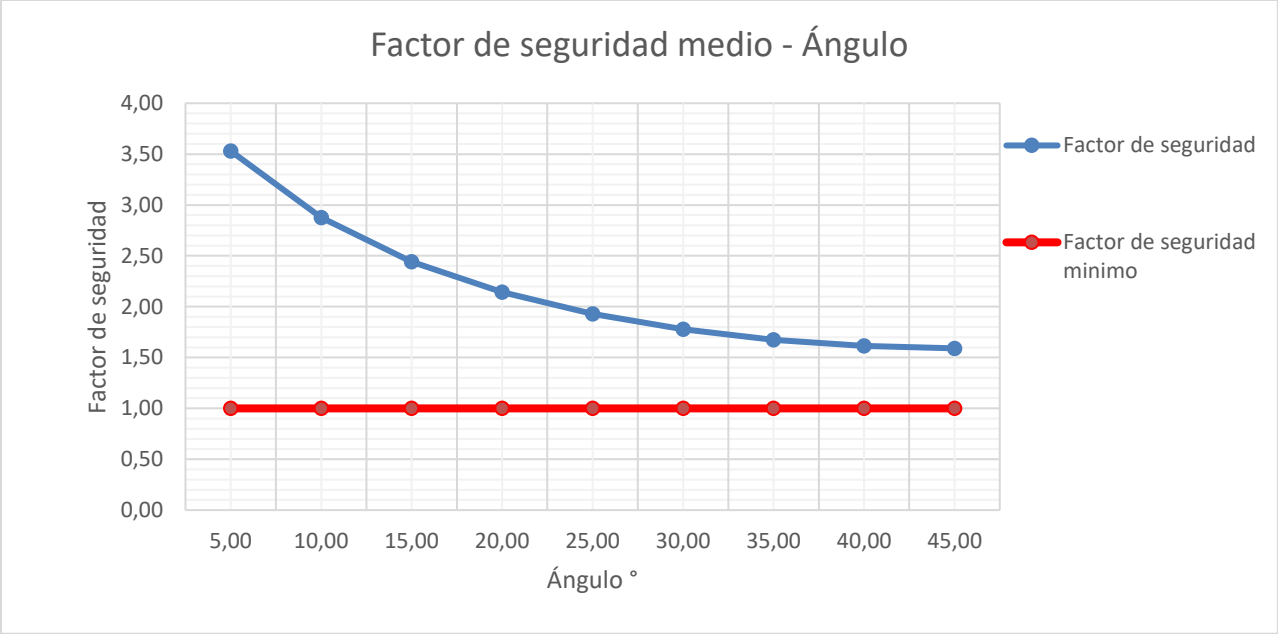


Figura 62. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 63), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando.

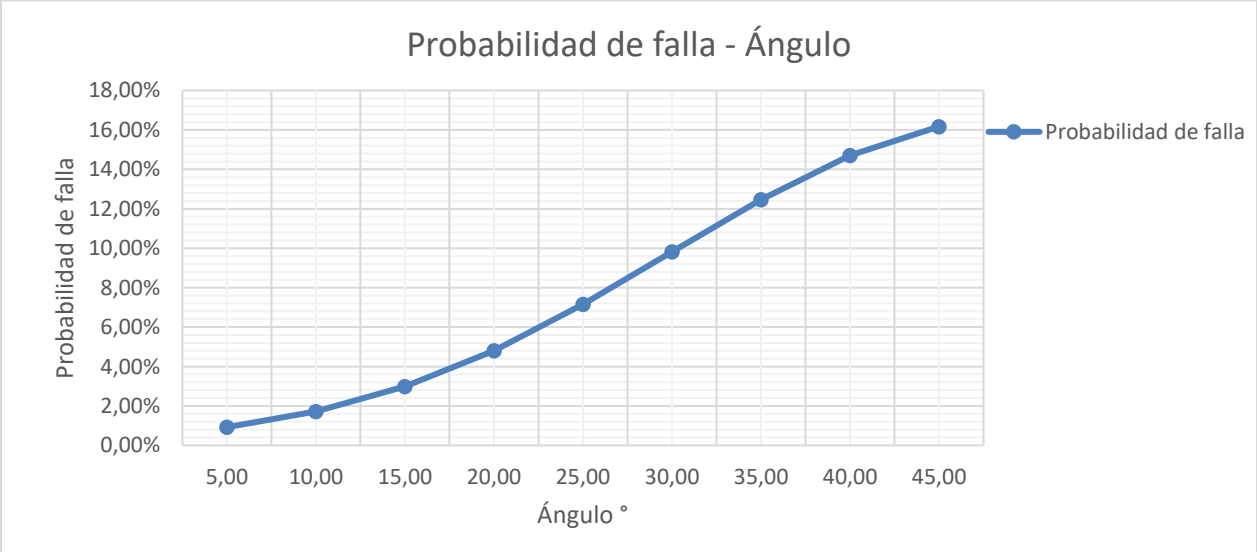


Figura 63. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 3.5m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 39) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 1.41 y máximo de 3.22. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 0.81% y 21,07%.

Tabla 39. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=3.5m

β	FS MEDIO	PF
5,00	3,22	0,81%
10,00	2,62	1,67%
15,00	2,22	3,17%
20,00	1,94	5,46%
25,00	1,74	8,55%
30,00	1,60	12,17%
35,00	1,50	15,85%
40,00	1,44	19,00%
45,00	1,41	21,07%

Se presenta la (Gráfica 64) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que no se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

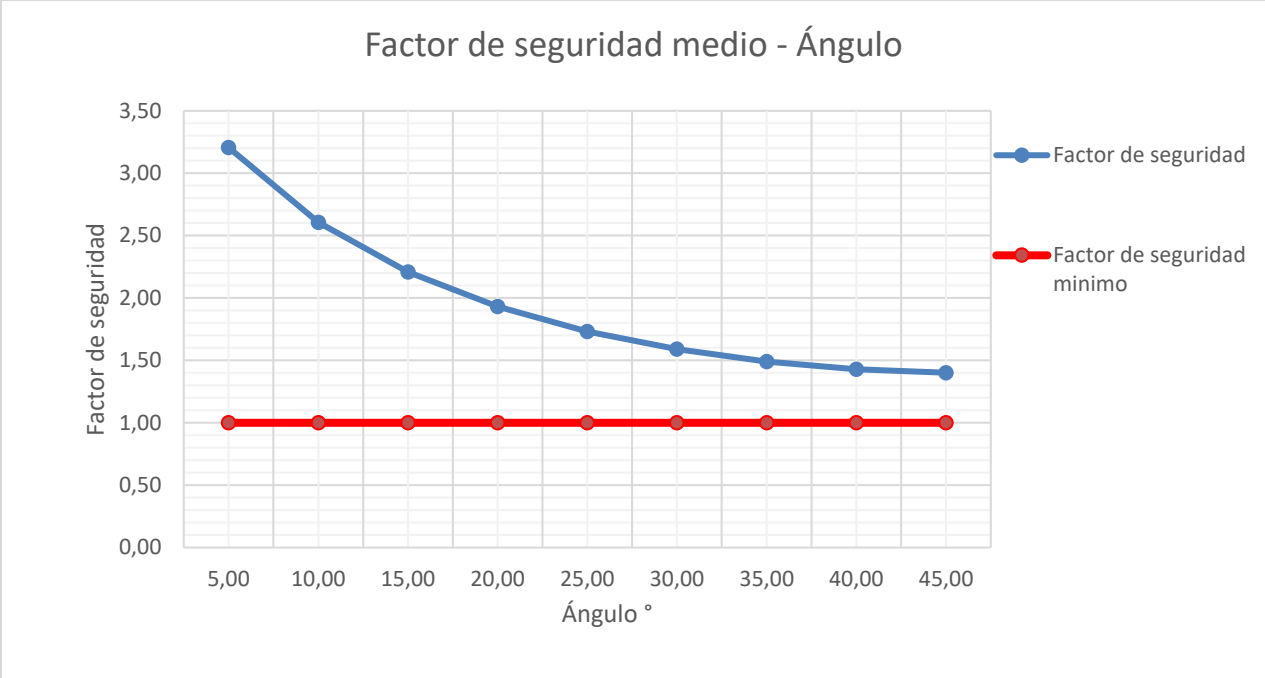


Figura 64. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 65), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando.

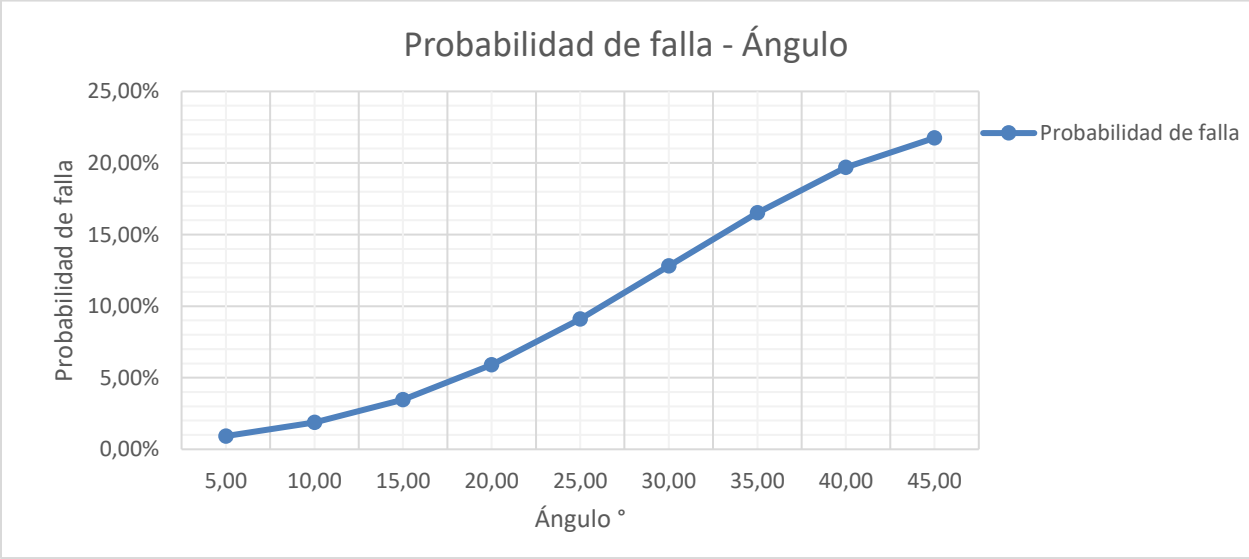


Figura 65. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 4.0m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 40) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 1.27 y máximo de 2.99. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 0.80% y 26,83%.

Tabla 40. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=4.0m

β	FS MEDIO	PF
5,00	2,99	0,80%
10,00	2,43	1,79%
15,00	2,05	3,59%
20,00	1,79	6,47%
25,00	1,60	10,44%
30,00	1,47	15,16%
35,00	1,37	19,98%
40,00	1,31	24,11%
45,00	1,27	26,83%

Se presenta la (Gráfica 66) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que no se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

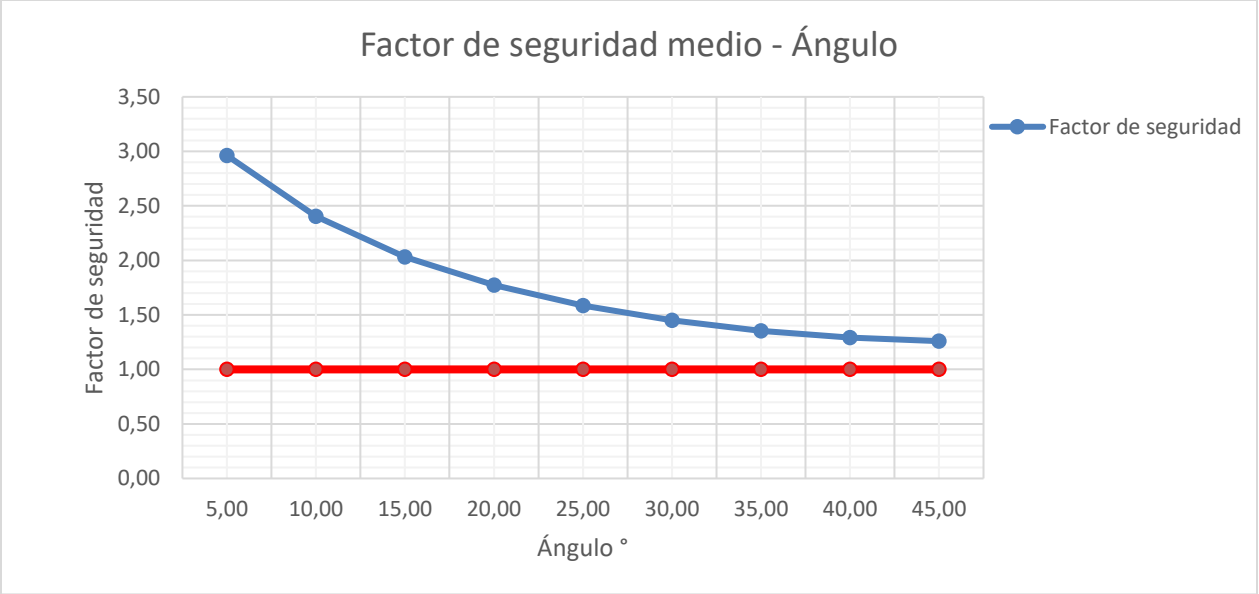


Figura 66. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 67), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando.

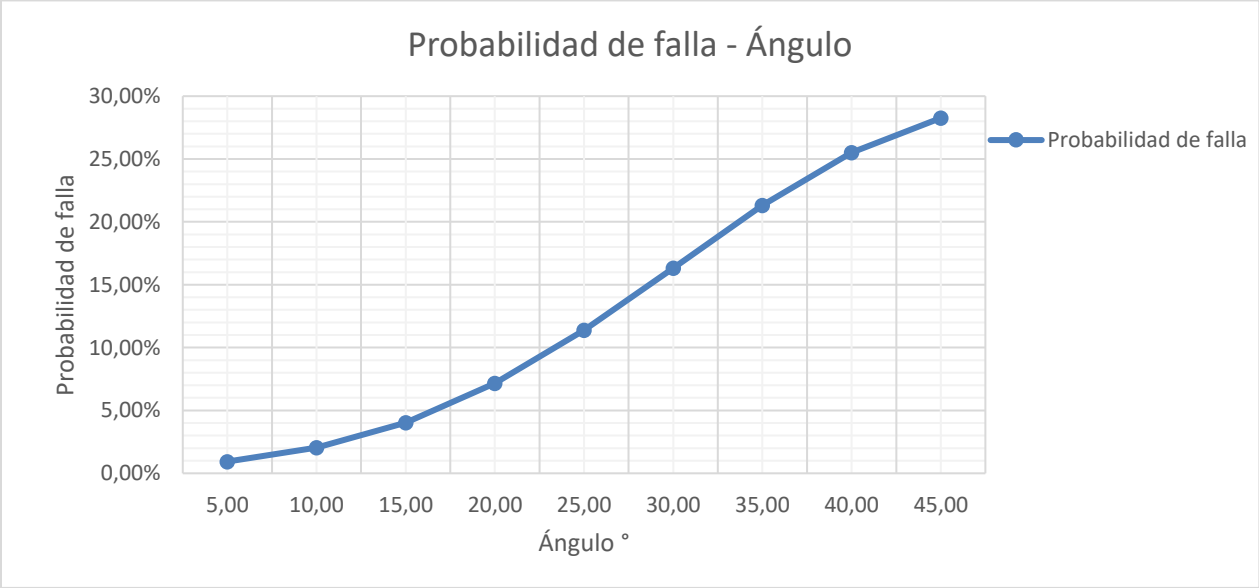


Figura 67. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 4.5m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 41) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 1.16 y máximo de 2.79. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 0.79% y 34,68%.

Tabla 41. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=4.5m

β	FS MEDIO	PF
5,00	2,79	0,79%
10,00	2,26	1,91%
15,00	1,91	4,12%
20,00	1,66	7,81%
25,00	1,48	13,04%
30,00	1,35	19,32%
35,00	1,25	25,70%
40,00	1,19	31,11%
45,00	1,16	34,68%

Se presenta la (Gráfica 68) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que no se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

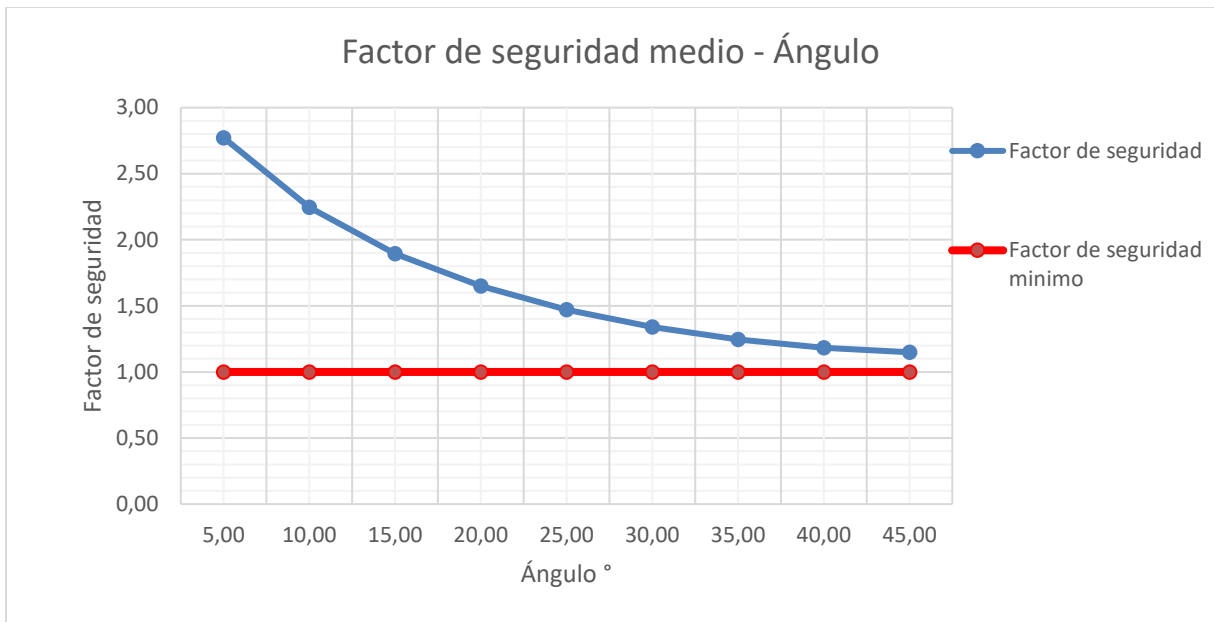


Figura 68. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 69), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando.

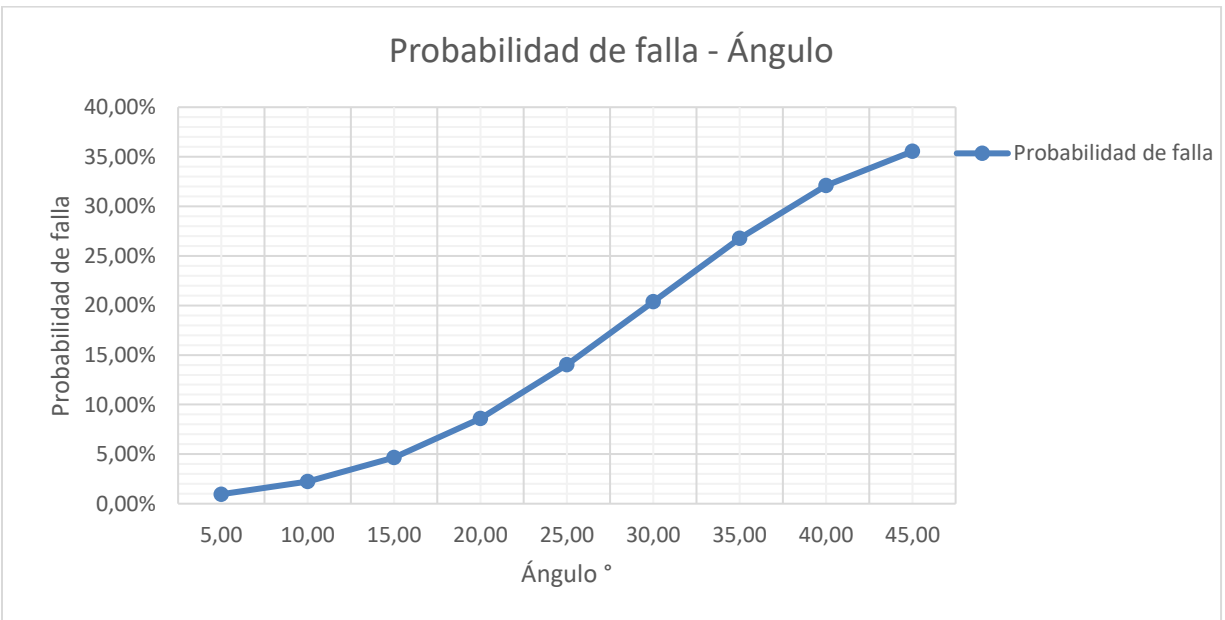


Figura 69. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 5.0m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 42) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 1.07 y máximo de 2.64. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 0.82% y 42,01%.

Tabla 42. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=5.0m

β	FS MEDIO	PF
5,00	2,64	0,82%
10,00	2,14	2,11%
15,00	1,80	4,76%
20,00	1,56	9,29%
25,00	1,39	15,77%
30,00	1,26	23,53%
35,00	1,17	31,31%
40,00	1,11	37,80%
45,00	1,07	42,01%

Se presenta la (Gráfica 70) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que no se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

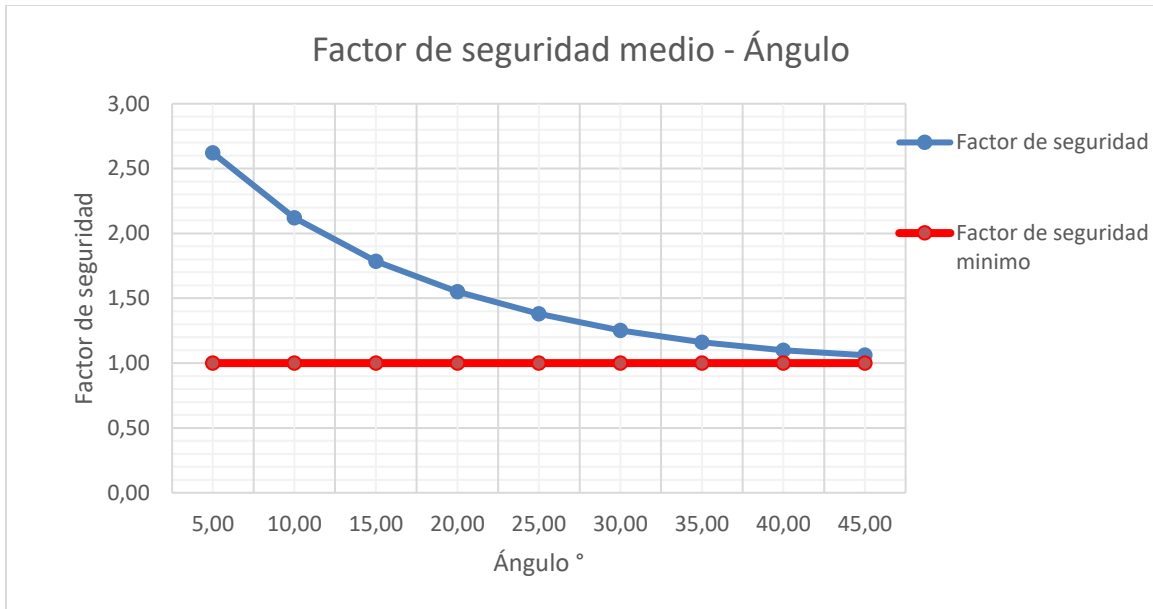


Figura 70. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 71), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando.

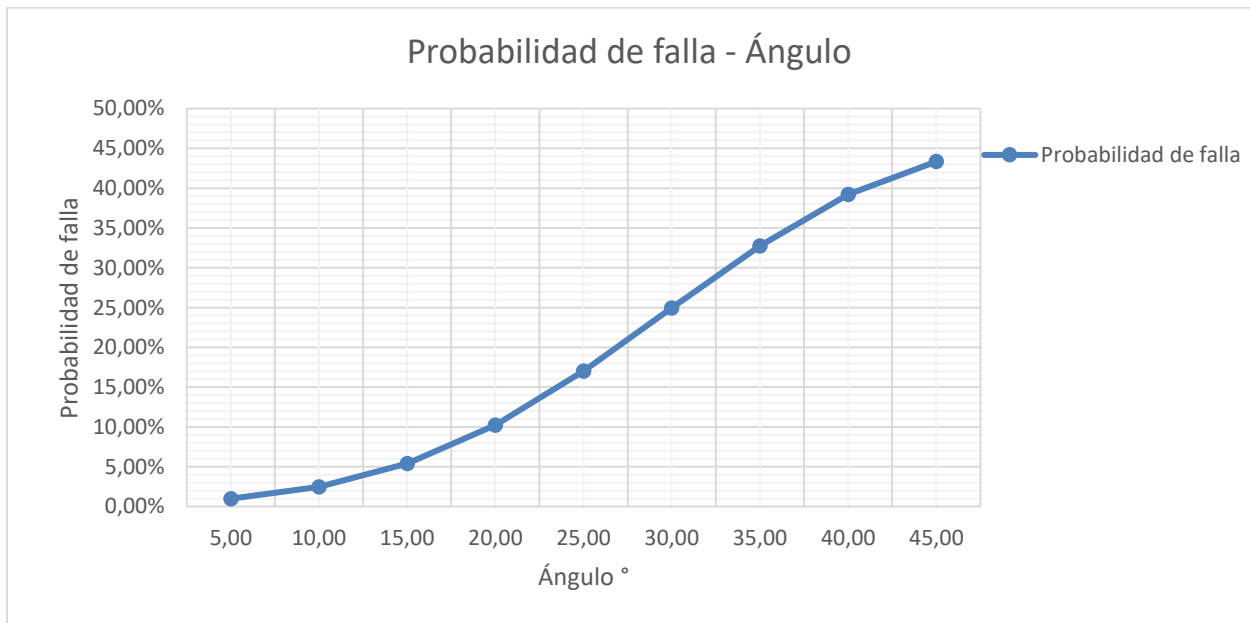


Figura 71. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 5.5m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 43) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 1.00 y máximo de 2.52. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 0.87% y 50.08%.

Tabla 43. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=5.5m

β	FS MEDIO	PF
5,00	2,52	0,87%
10,00	2,04	2,38%
15,00	1,71	5,57%
20,00	1,48	11,11%
25,00	1,32	19,06%
30,00	1,19	28,47%
35,00	1,10	37,72%
40,00	1,04	45,26%
45,00	1,00	50,08%

Se presenta la (Gráfica 72) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que el factor de seguridad se encuentra al límite del mínimo aceptable expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

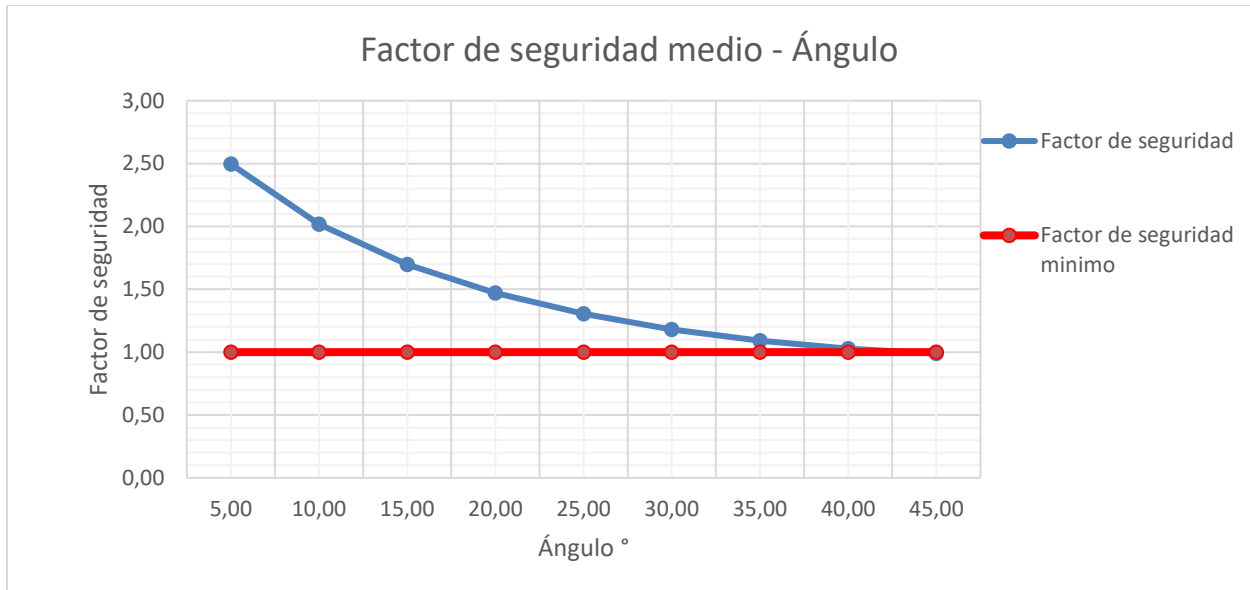


Figura 72. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 73), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Adicionalmente se evidencia que las probabilidades de falla sobrepasan el 50%

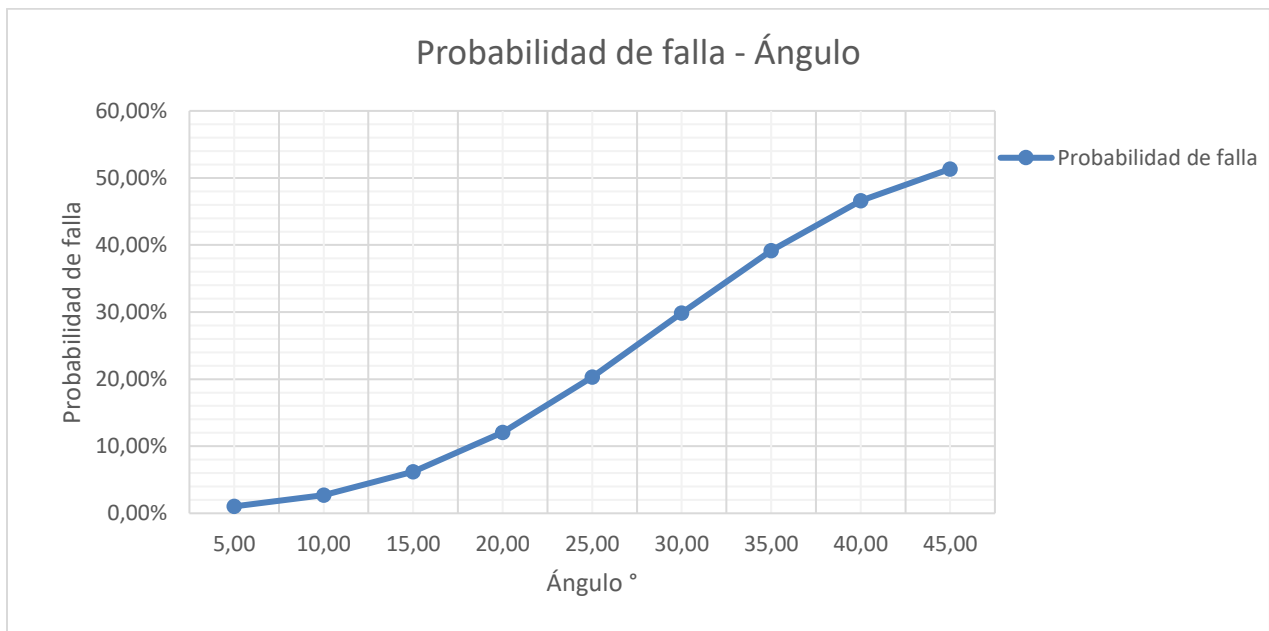


Figura 73. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 6.0m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 44) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 0.93 y máximo de 2.40. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 0.89% y 59.12%.

Tabla 44. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=6.0m

β	FS MEDIO	PF
5,00	2,40	0,89%
10,00	1,94	2,61%
15,00	1,63	6,41%
20,00	1,41	13,20%
25,00	1,25	22,97%
30,00	1,13	34,34%
35,00	1,04	45,21%
40,00	0,97	53,78%
45,00	0,93	59,12%

Se presenta la (Gráfica 74) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que algunos factores de seguridad se encuentran por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

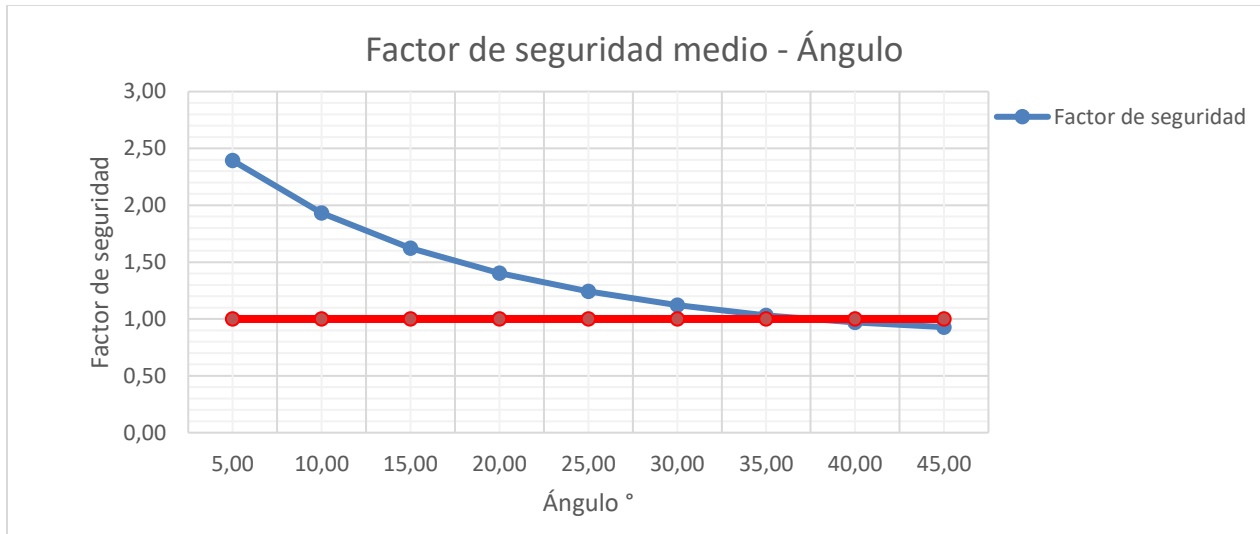


Figura 74. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 75), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Adicionalmente se evidencia que las probabilidades de falla sobrepasan el 50%.

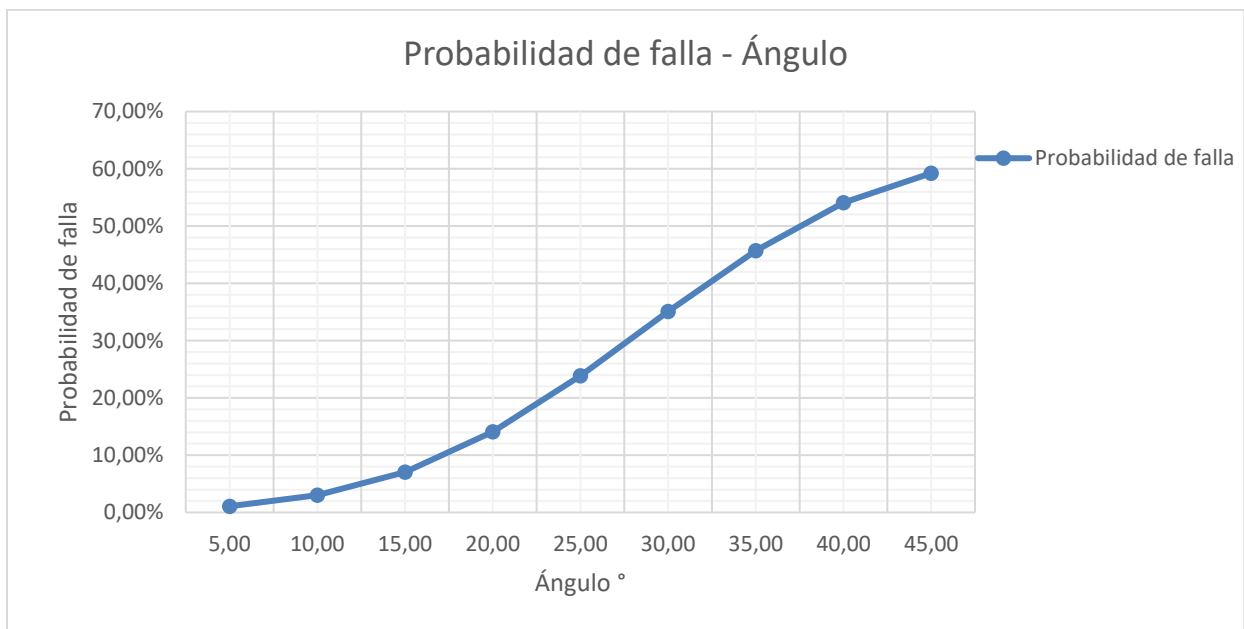


Figura 75. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 6.5m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 45) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 0.88 y máximo de 2.32. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 1.03% y 66.47%.

Tabla 45. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=6.5m

β	FS MEDIO	PF
5,00	2,32	1,03%
10,00	1,87	3,06%
15,00	1,57	7,55%
20,00	1,35	15,52%
25,00	1,19	26,81%
30,00	1,08	39,70%
35,00	0,99	51,68%
40,00	0,92	60,86%
45,00	0,88	66,47%

Se presenta la (Gráfica 76) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que algunos factores de seguridad se encuentran por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

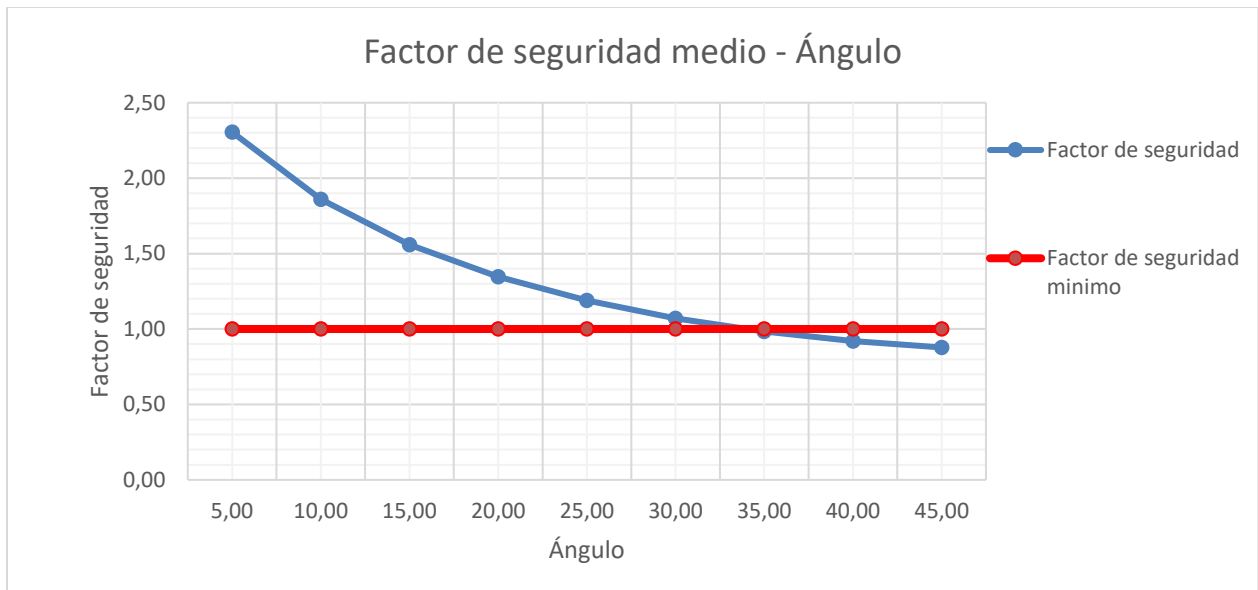


Figura 76. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 77), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Adicionalmente se evidencia que las probabilidades de falla sobrepasan el 50%.

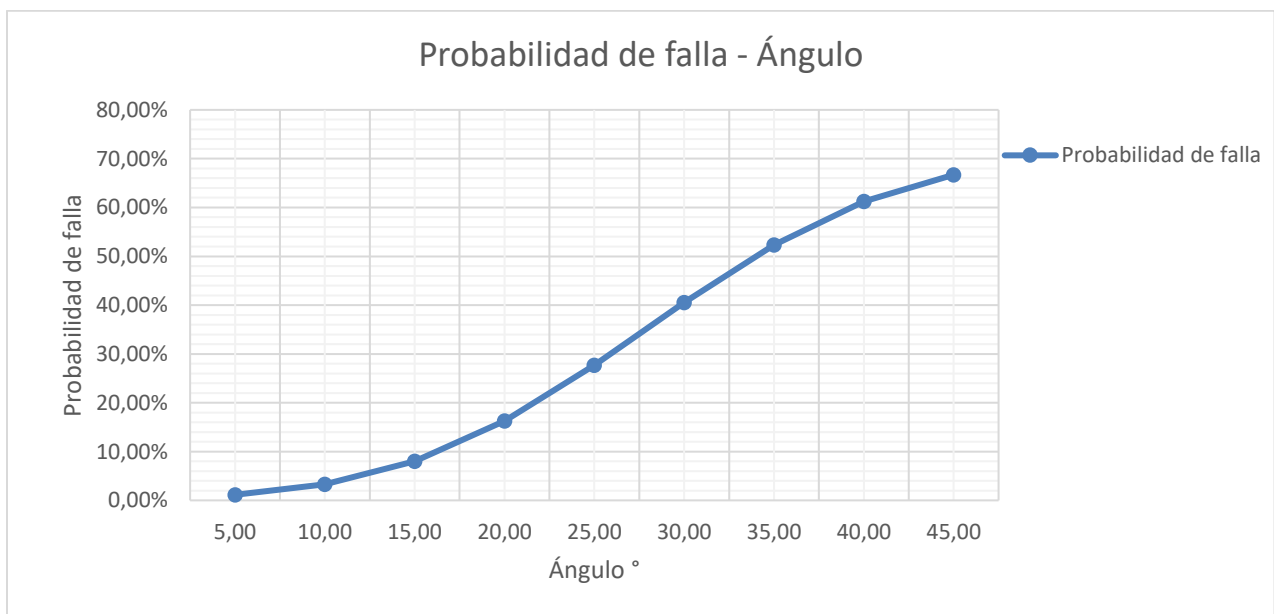


Figura 77. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 7.0m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 46) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 0.84 y máximo de 2.24. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 1.17% y 72.84%.

Tabla 46. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=7.0m

β	FS MEDIO	PF
5,00	2,24	1,17%
10,00	1,81	3,52%
15,00	1,51	8,75%
20,00	1,31	17,98%
25,00	1,15	30,82%
30,00	1,03	45,04%
35,00	0,95	57,81%
40,00	0,88	67,24%
45,00	0,84	72,84%

Se presenta la (Gráfica 78) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que algunos factores de seguridad se encuentran por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

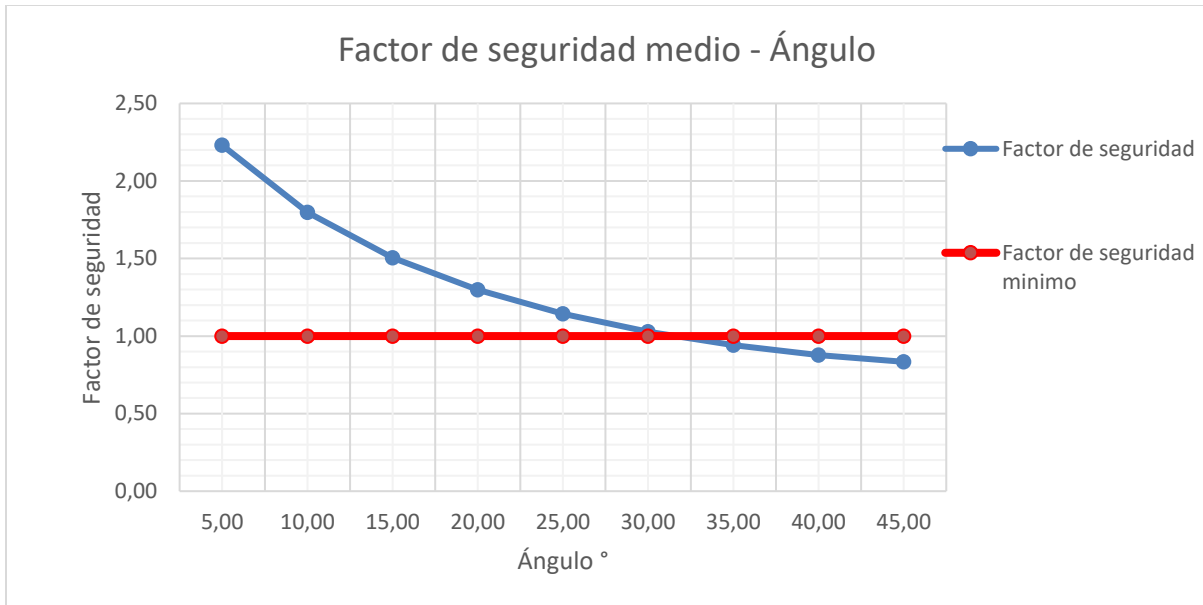


Figura 78. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 79), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Adicionalmente se evidencia que las probabilidades de falla sobrepasan el 50%.

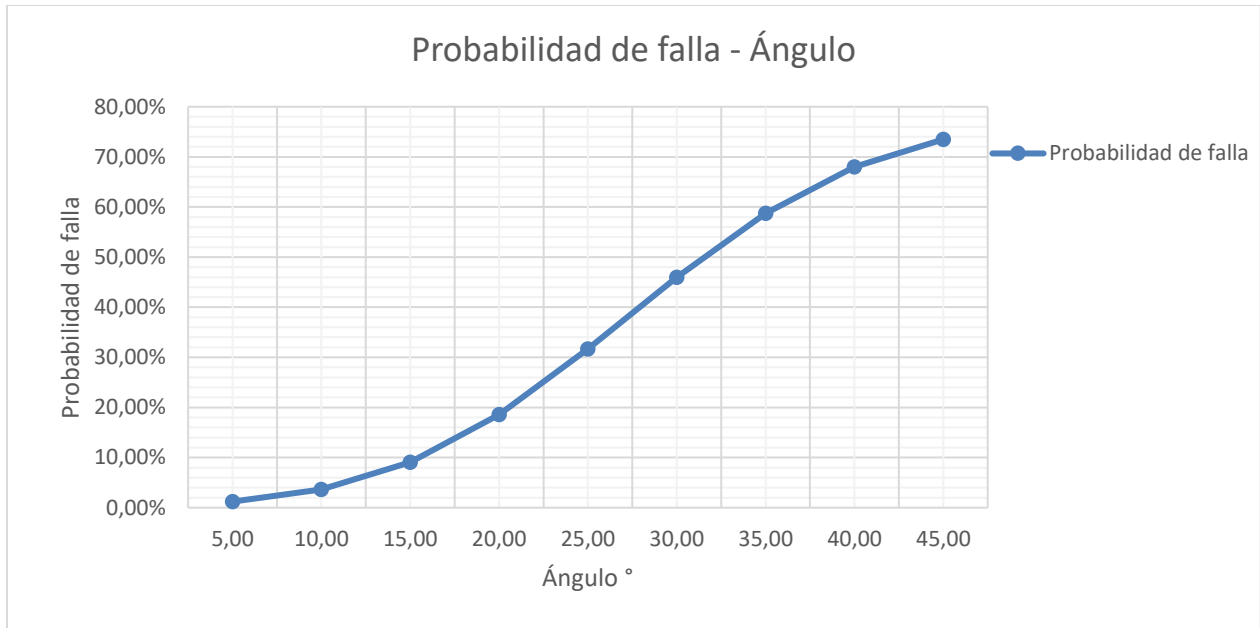


Figura 79. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 7.5m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 47) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 0.81 y máximo de 2.18. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 1.16% y 78,71%.

Tabla 47. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=7.5m$

β	FS MEDIO	PF
5,00	2,18	1,16%
10,00	1,76	3,67%
15,00	1,47	9,43%
20,00	1,27	19,77%
25,00	1,12	34,15%
30,00	1,00	49,83%
35,00	0,91	63,46%
40,00	0,85	73,15%
45,00	0,81	78,71%

Se presenta la (Gráfica 80) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que algunos factores de seguridad se encuentran por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

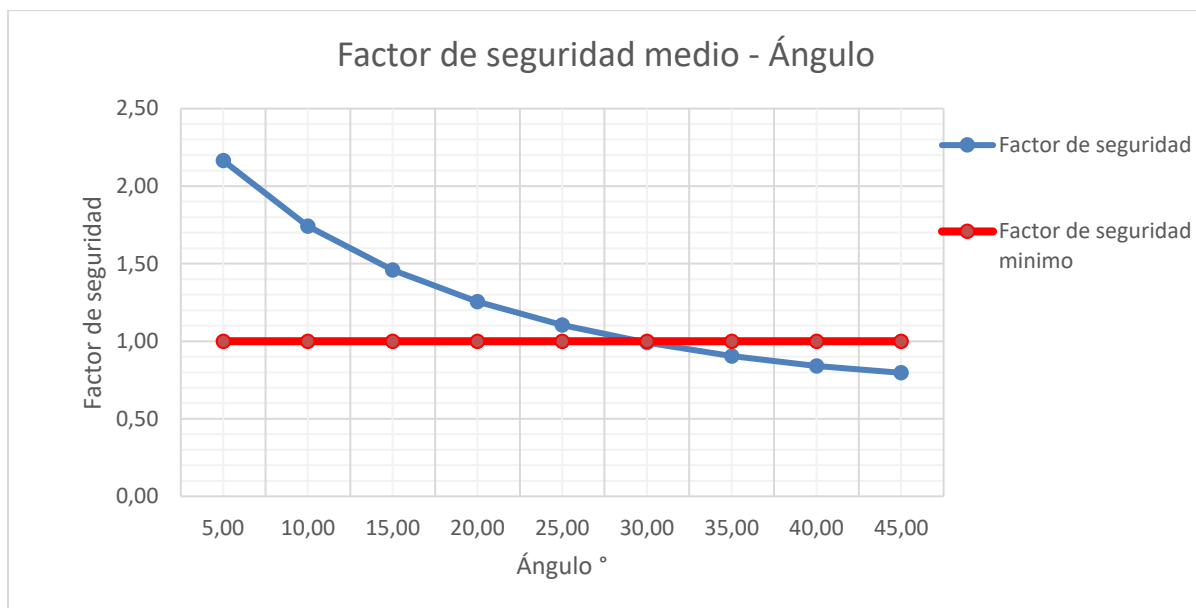


Figura 80. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 81), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Adicionalmente se evidencia que las probabilidades de falla sobrepasan el 50%.

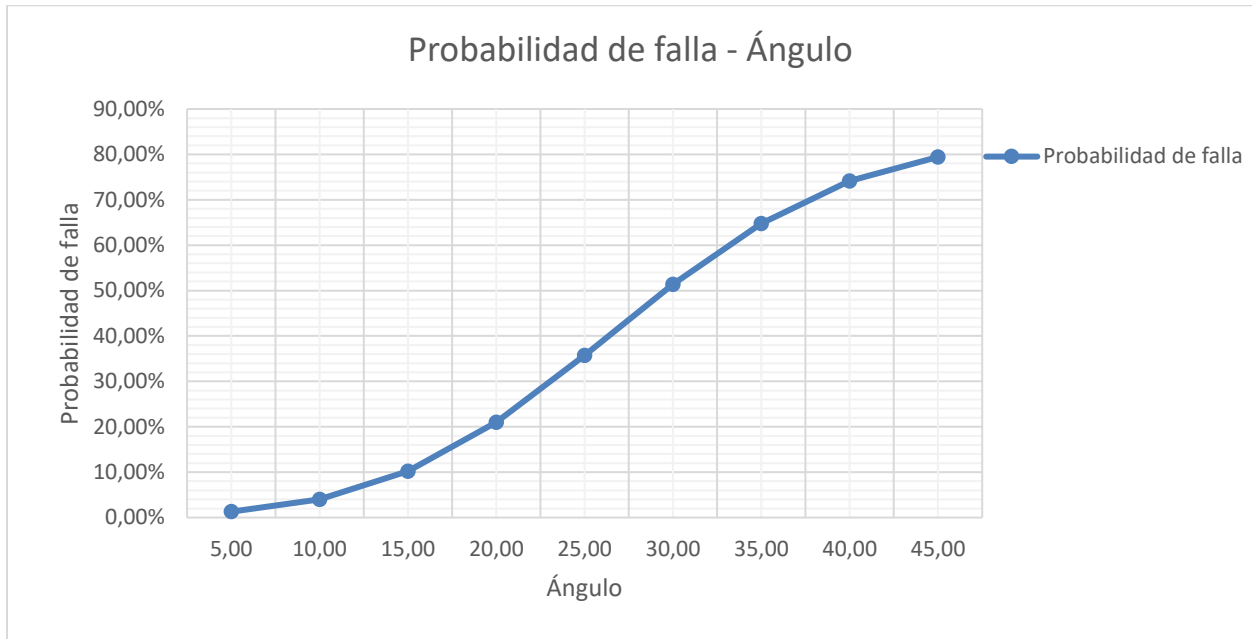


Figura 81. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 8.0m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 48) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 0.77 y máximo de 2.12. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 1.34% y 83,92%.

Tabla 48. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=8.0m

β	FS MEDIO	PF
5,00	2,12	1,34%
10,00	1,71	4,28%
15,00	1,43	11,01%
20,00	1,23	22,86%
25,00	1,08	38,87%
30,00	0,96	55,60%
35,00	0,88	69,44%
40,00	0,81	78,78%
45,00	0,77	83,92%

Se presenta la (Gráfica 82) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que algunos factores de seguridad se encuentran por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

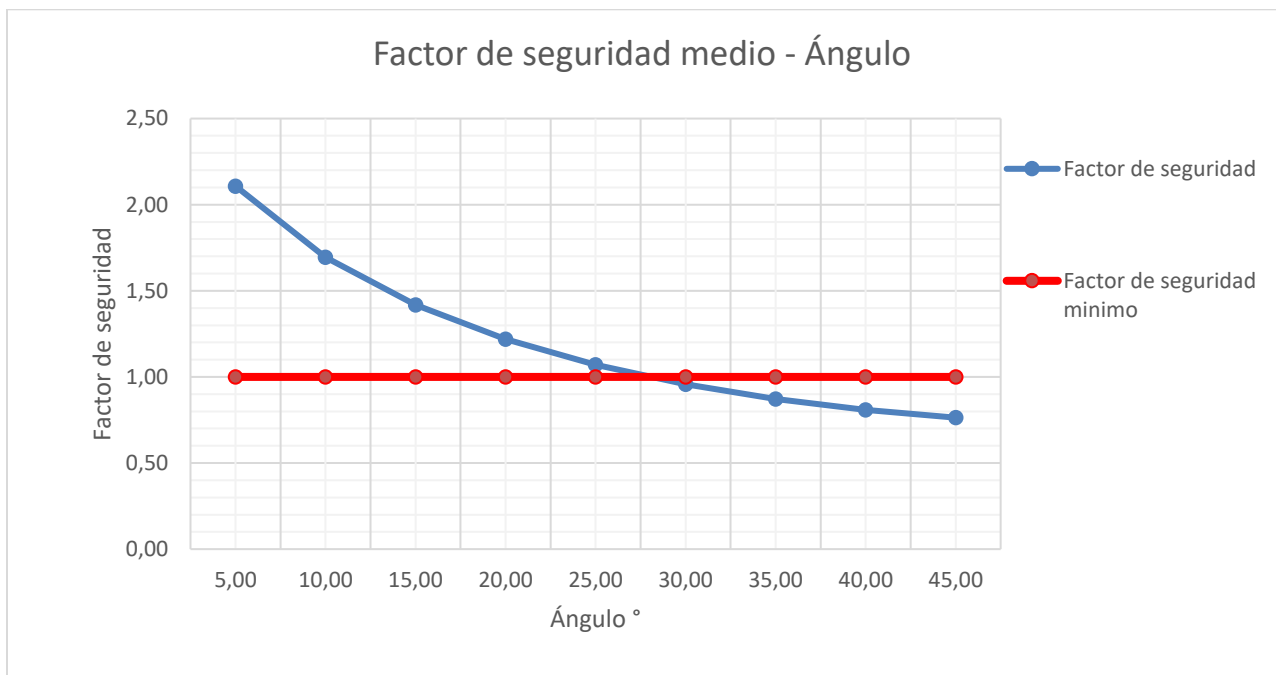


Figura 82. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 83), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Adicionalmente se evidencia que las probabilidades de falla sobrepasan el 80%.

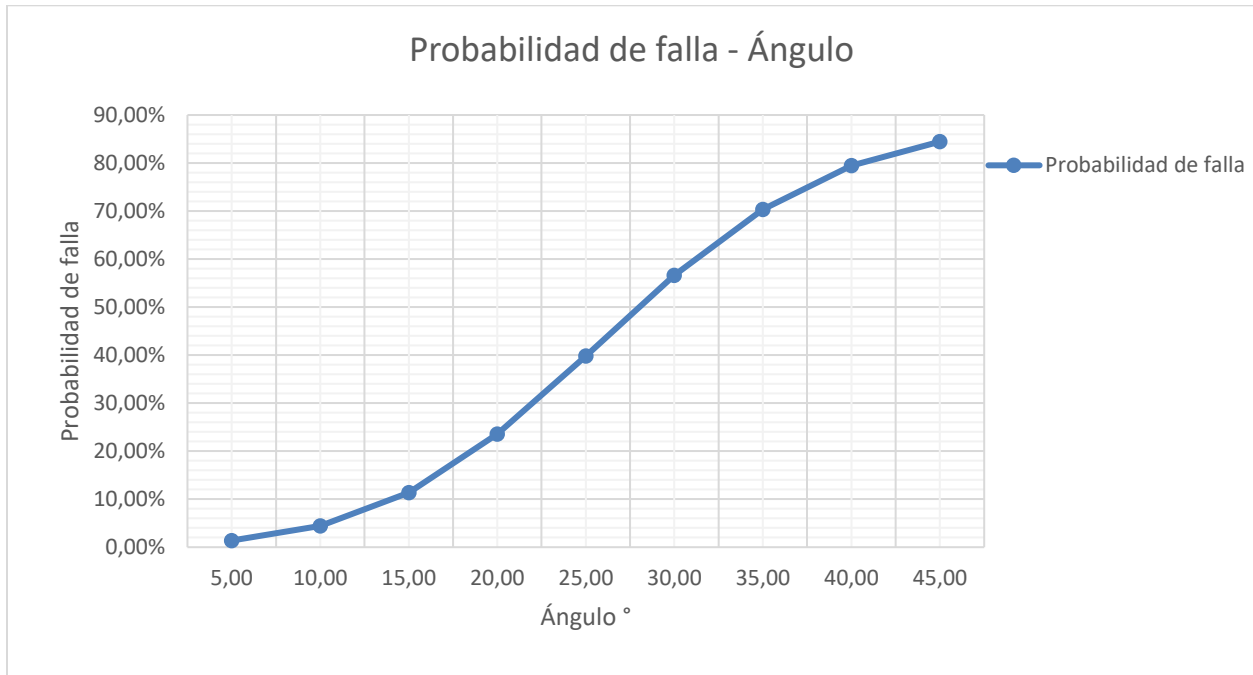


Figura 83. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 8.5m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 49) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 0.74 y máximo de 2.07. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 1.33% y 88,19%.

Tabla 49. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=8.5m

β	FS MEDIO	PF
5,00	2,07	1,33%
10,00	1,67	4,47%
15,00	1,39	11,88%
20,00	1,19	25,07%
25,00	1,05	42,69%
30,00	0,94	60,53%
35,00	0,85	74,58%
40,00	0,79	83,51%
45,00	0,74	88,19%

Se presenta la (Gráfica 84) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que algunos factores de seguridad se encuentran por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

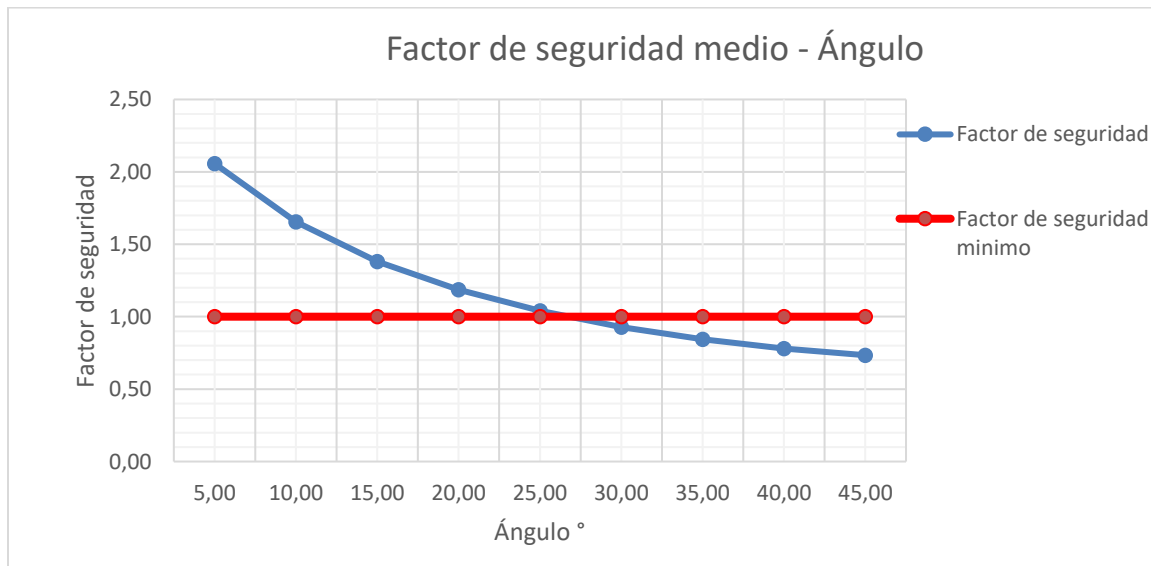


Figura 84. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 85), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Adicionalmente se evidencia que las probabilidades de falla sobrepasan el 80%.

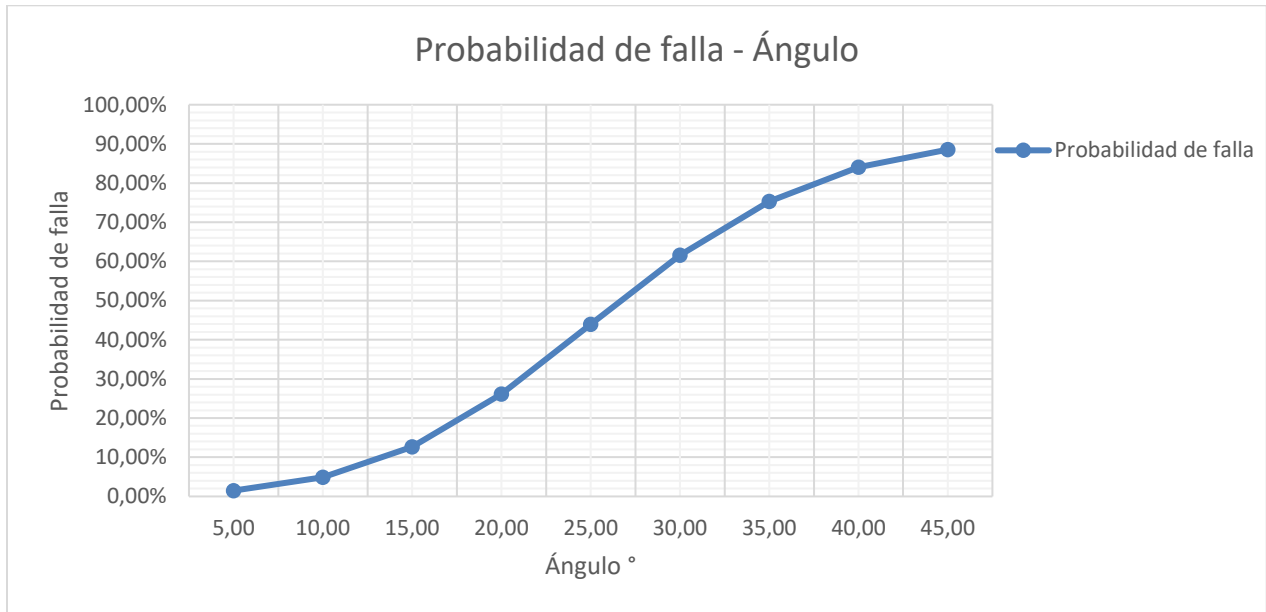


Figura 85. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 9.0m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 50) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 0.71 y máximo de 2.03. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 1.32% y 91,67%.

Tabla 50. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=9.0m

β	FS MEDIO	PF
5,00	2,03	1,32%
10,00	1,63	4,65%
15,00	1,36	12,78%
20,00	1,17	27,38%
25,00	1,02	46,61%
30,00	0,91	65,35%
35,00	0,83	79,29%
40,00	0,76	87,58%
45,00	0,71	91,67%

Se presenta la (Gráfica 86) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que algunos factores de seguridad se encuentran por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

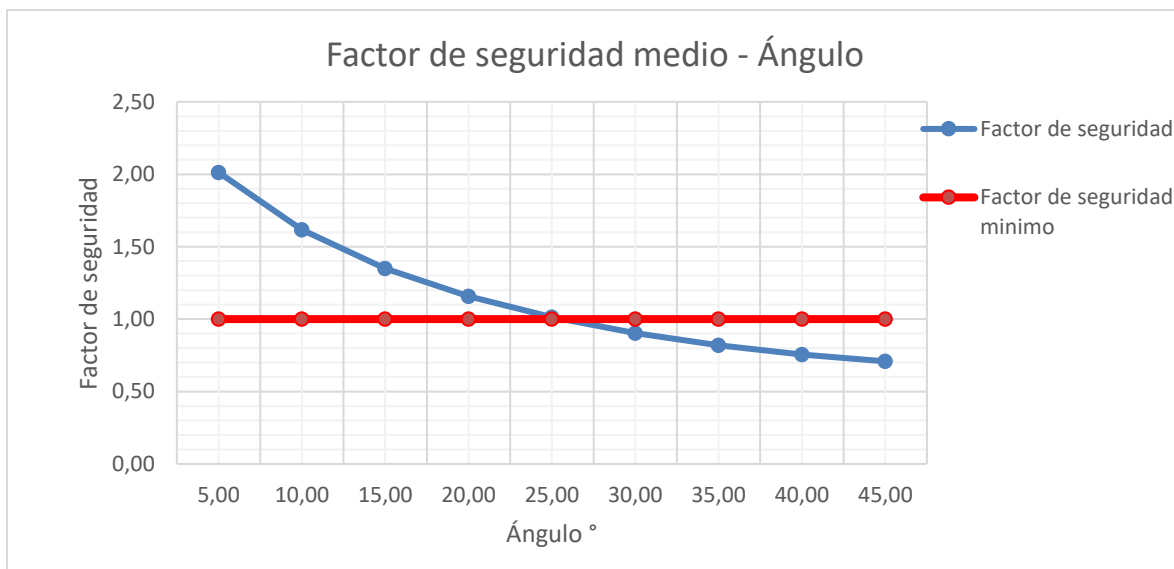


Figura 86. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 87), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Adicionalmente se evidencia que las probabilidades de falla sobrepasan el 90%.

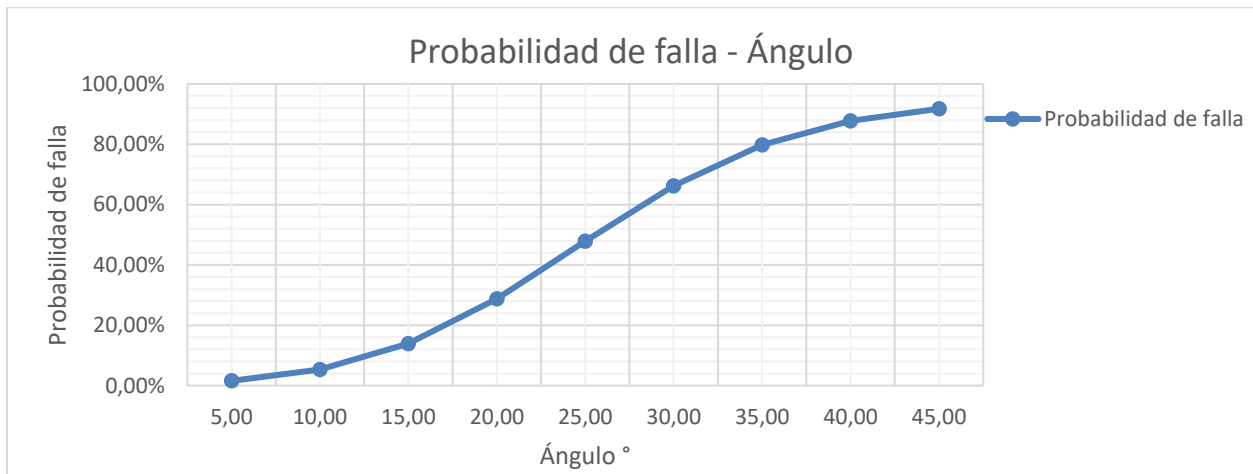


Figura 87. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud

10.6. Anexo síntesis método de Montecarlo 5000 iteraciones altura de agua del 50%.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo con tabla de agua a la mitad del espesor del estrato blando, alturas del estrato blando de 1.0 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 51) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 4.10 y máximo de 7.77. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 1.10% y 3.24%.

Tabla 51. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=1.0m

β	FS MEDIO	PF
5,00	7,77	1,10%
10,00	6,39	1,38%
15,00	5,51	1,70%
20,00	4,92	2,04%
25,00	4,53	2,39%
30,00	4,27	2,71%
35,00	4,14	2,97%
40,00	4,10	3,16%
45,00	4,16	3,24%

Se presenta la (Figura 88) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que no se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989) como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

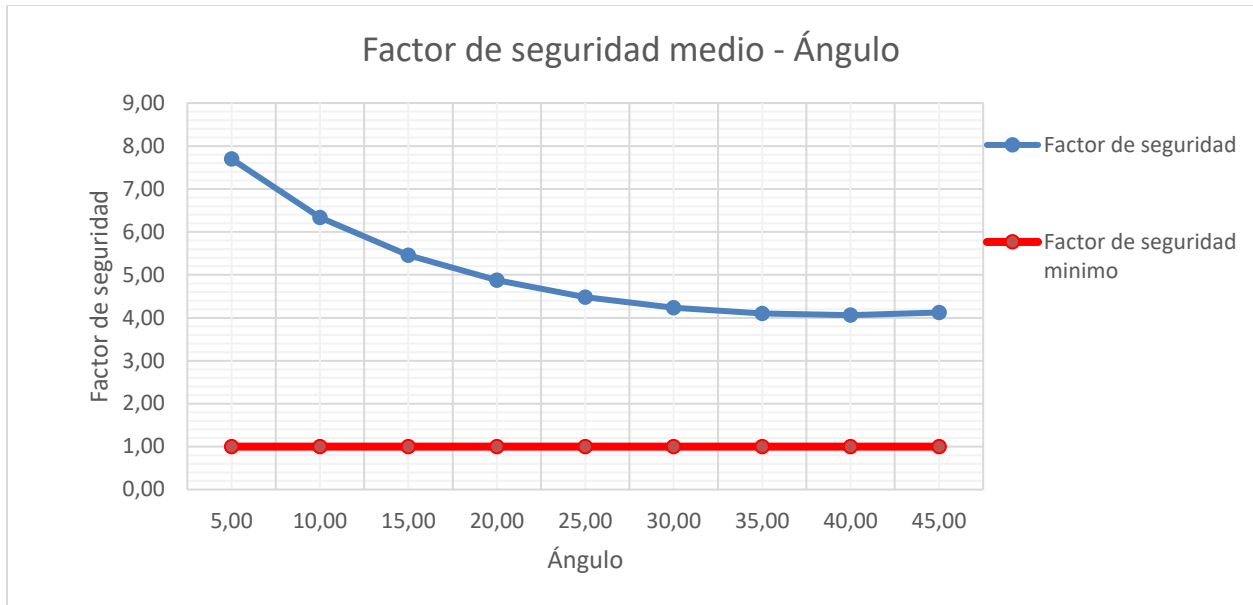


Figura 88. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 89), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Para el caso se tiene una probabilidad de falla superior al 3%.

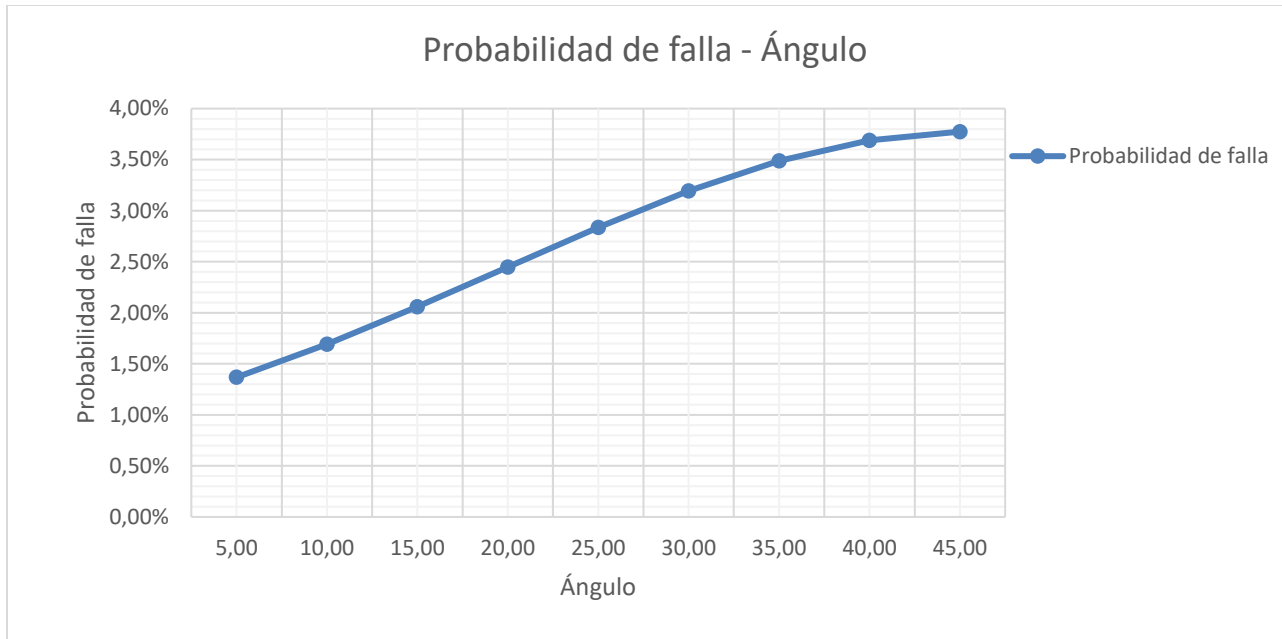


Figura 89. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 1.5 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 52) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S. mínimo de 2.80 y máximo de 5.47. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 1.19% y 5.49%.

Tabla 52. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=1.5m

β	FS MEDIO	PF
5,00	5,47	1,19%
10,00	4,49	1,65%
15,00	3,85	2,23%
20,00	3,43	2,89%
25,00	3,14	3,60%
30,00	2,95	4,29%
35,00	2,84	4,88%
40,00	2,80	5,30%
45,00	2,83	5,49%

Se presenta la (Figura 90) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación para z de 1.5m, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que no se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989) como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

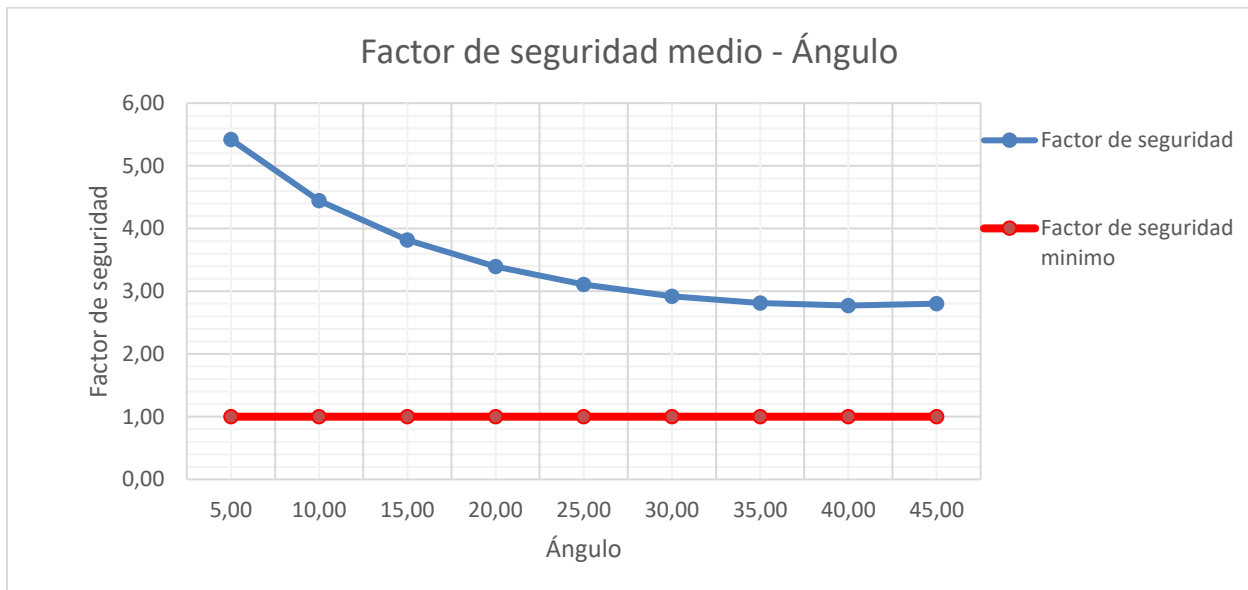


Figura 90. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 91), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Para el caso se tiene una probabilidad de falla superior al 5%.

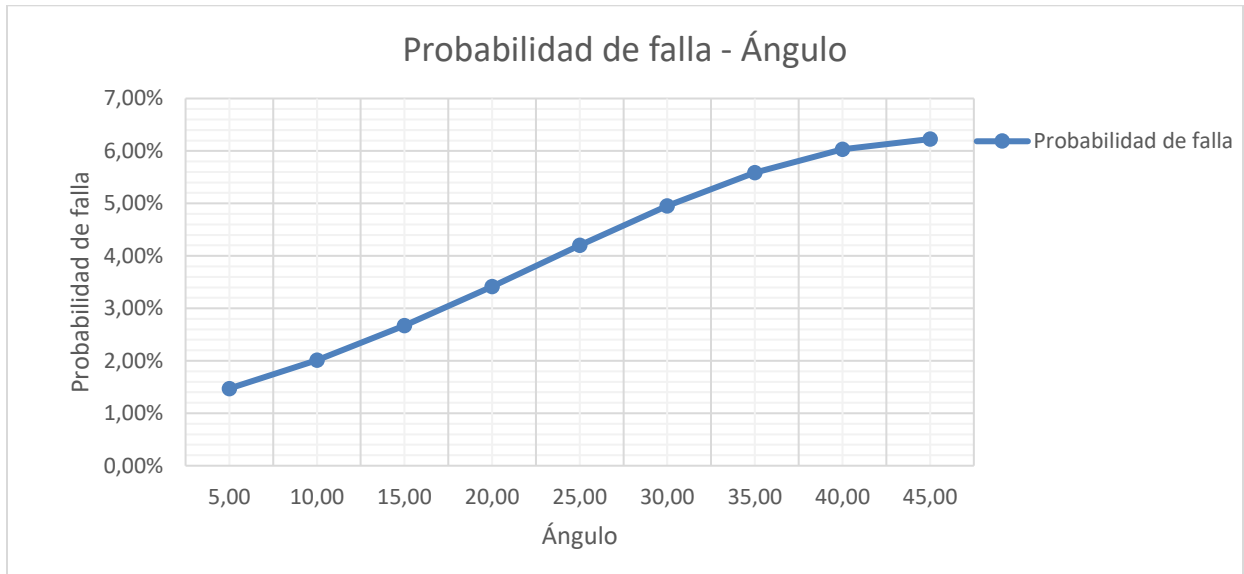


Figura 91. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 2.0 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 53) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S. mínimo de 2.12 y máximo de 4.28. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 1.51% y 9.55%.

Tabla 53. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=2.0m$

β	FS MEDIO	PF
5,00	4,28	1,51%
10,00	3,50	2,28%
15,00	2,99	3,30%
20,00	2,65	4,53%
25,00	2,42	5,88%
30,00	2,26	7,22%
35,00	2,17	8,37%
40,00	2,12	9,19%
45,00	2,13	9,55%

Se presenta la (Figura 92) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación para z de 2.0 m, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que no se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989) como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

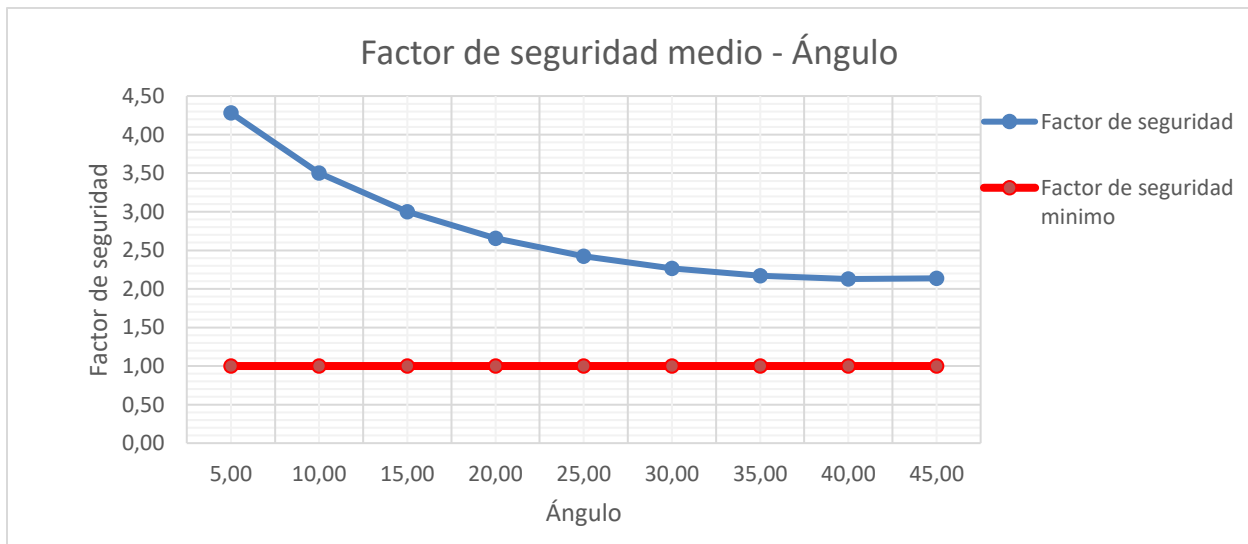


Figura 92. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 93), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Para el caso se tiene una probabilidad de falla superior al 9%.

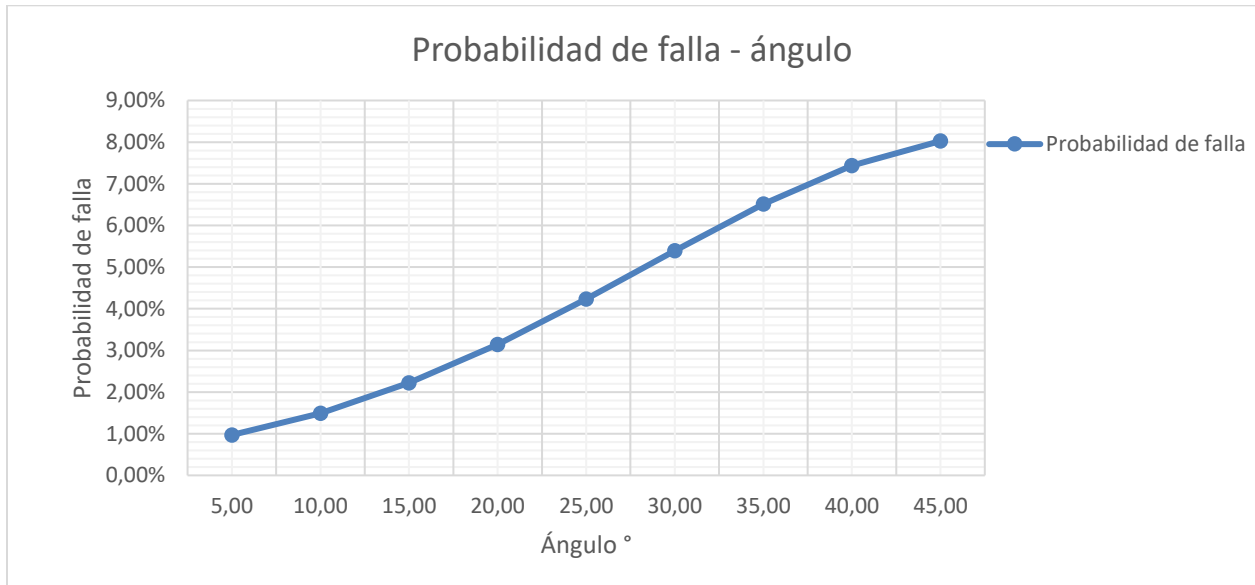


Figura 93. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 2.5 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 54) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S. mínimo de 1.74 y máximo de 3.61. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 1.78% y 14.73%.

Tabla 54. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=2.5m$

β	FS MEDIO	PF
5,00	3,61	1,78%
10,00	2,94	2,90%
15,00	2,51	4,45%
20,00	2,22	6,40%
25,00	2,01	8,60%
30,00	1,87	10,81%
35,00	1,79	12,74%
40,00	1,74	14,12%
45,00	1,74	14,73%

Se presenta la (Figura 94) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación para z de 2.5 m, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que no se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989) como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

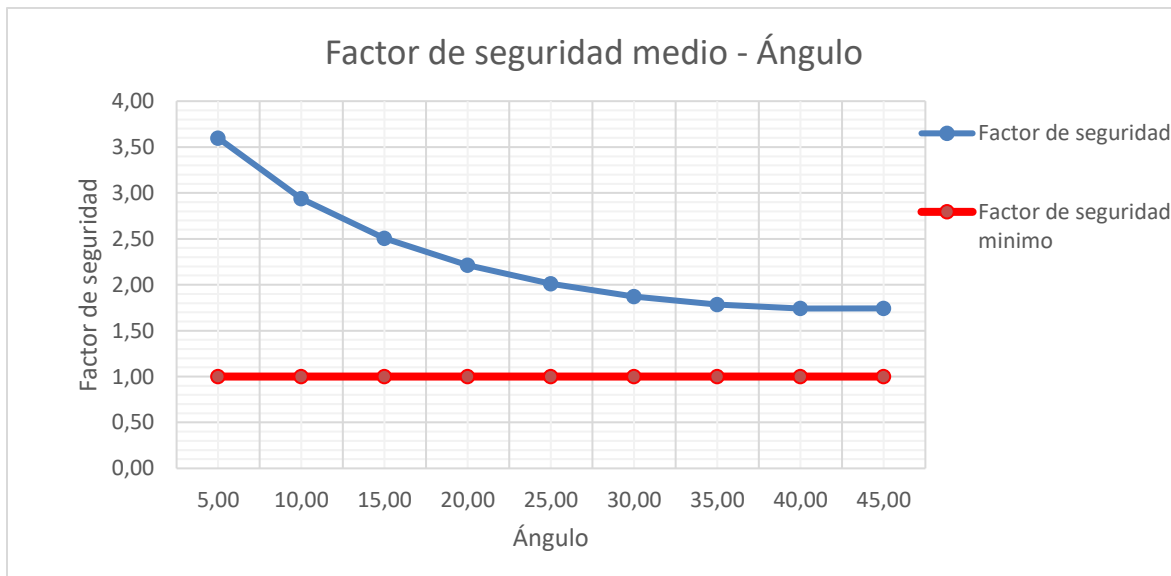


Figura 94. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 95), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Para el caso se tiene una probabilidad de falla superior al 14%.

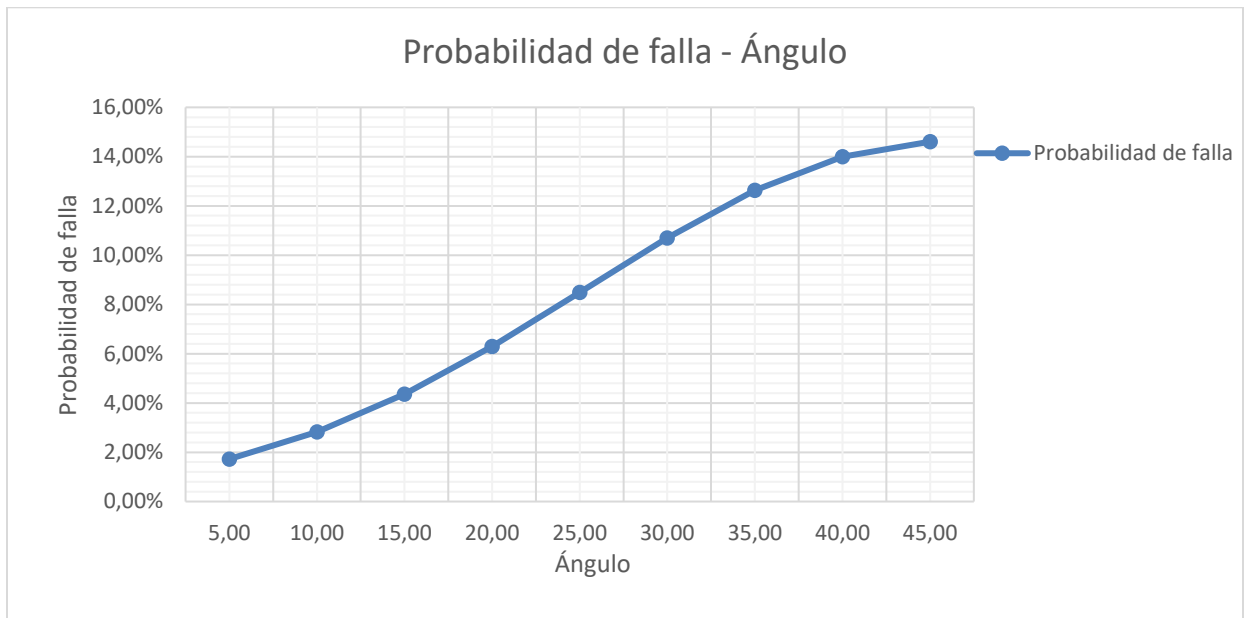


Figura 95. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 3.0 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 55) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S. mínimo de 1.48 y máximo de 4.28. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 1.72% y 20.029%.

Tabla 55. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=3.0m

β	FS MEDIO	PF
5,00	3,14	1,72%
10,00	2,56	3,10%
15,00	2,18	5,17%
20,00	1,92	7,91%
25,00	1,74	11,12%
30,00	1,61	14,41%
35,00	1,53	17,31%
40,00	1,48	19,37%
45,00	1,48	20,29%

Se presenta la (Figura 96) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación para z de 3.0 m, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que no se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989) como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

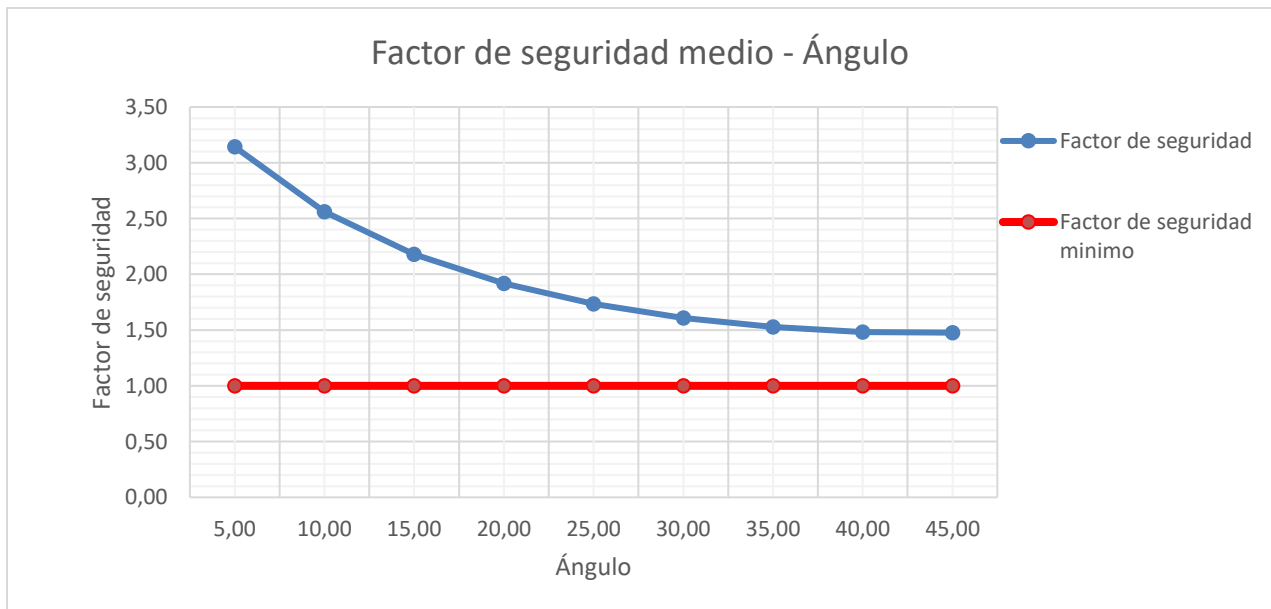


Figura 96. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 97), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Para el caso se tiene una probabilidad de falla superior al 20%.

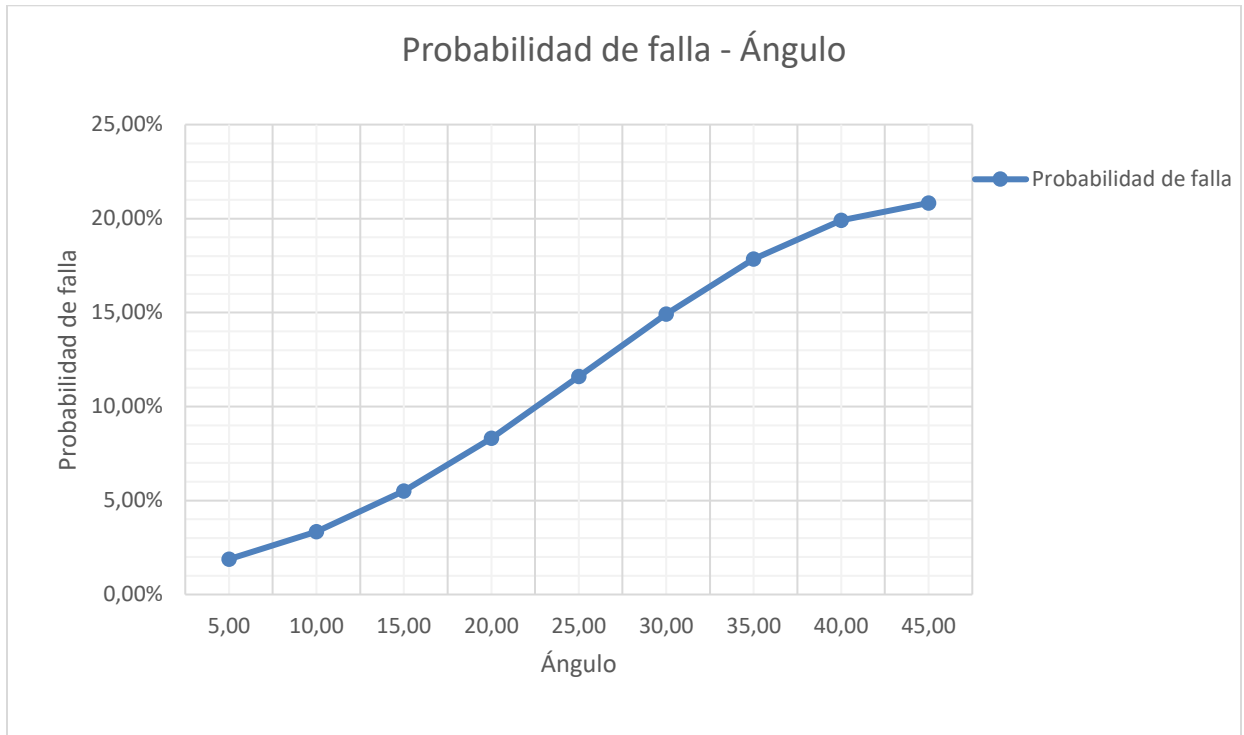


Figura 97. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 3.5 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 56) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S. mínimo de 1.29 y máximo de 2.82. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 1.89% y 27.92%.

Tabla 56. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=3.5\text{m}$

β	FS MEDIO	PF
5,00	2,82	1,89%
10,00	2,29	3,69%
15,00	1,95	6,52%
20,00	1,71	10,37%
25,00	1,54	14,94%
30,00	1,42	19,62%
35,00	1,34	23,73%
40,00	1,30	26,63%
45,00	1,29	27,92%

Se presenta la (Figura 98) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación para z de 3.5 m, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que no se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989) como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

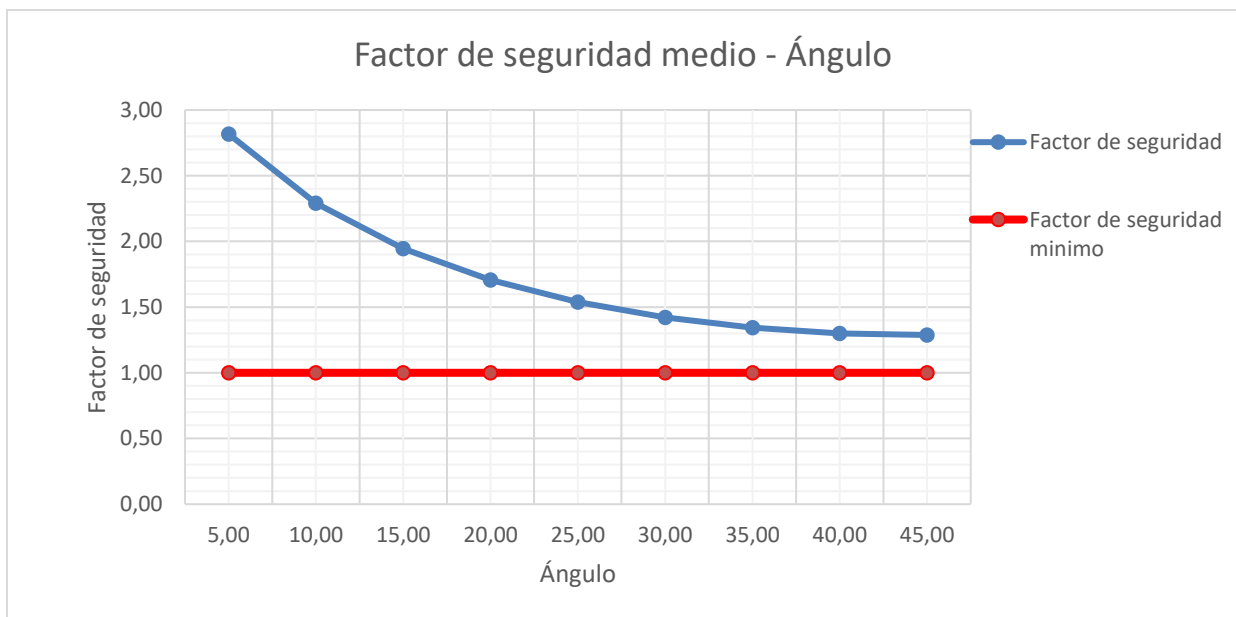


Figura 98. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 99), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Para el caso se tiene una probabilidad de falla superior al 27.92%.

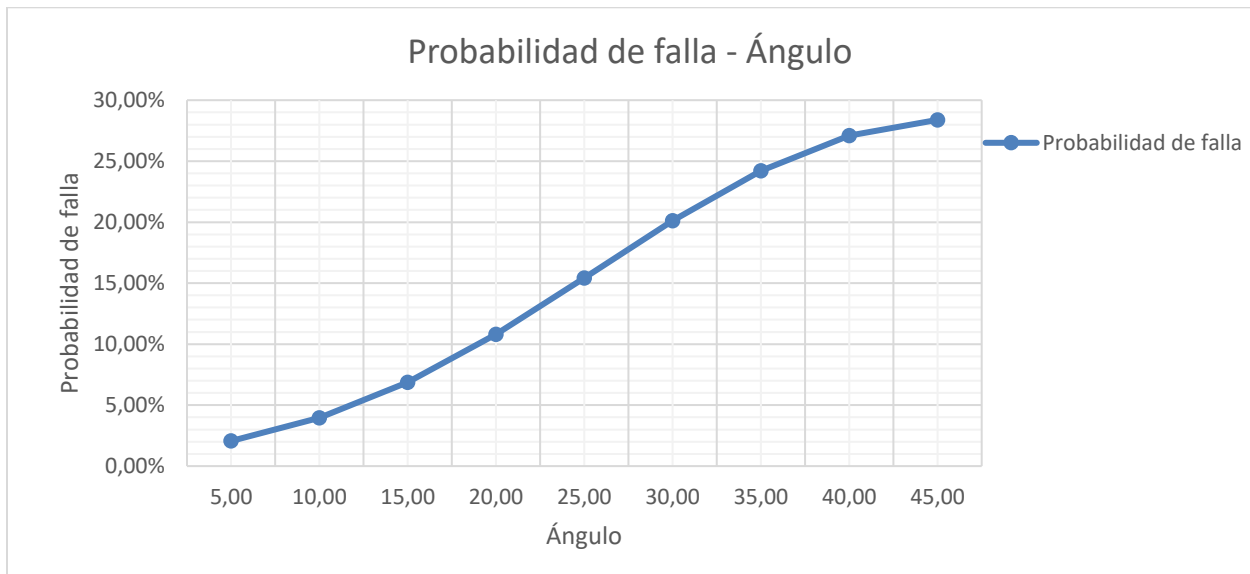


Figura 99. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 4.0 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 57) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S. mínimo de 1.15 y máximo de 2.52. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 2.08% y 36.68%.

Tabla 57. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=4.0\text{m}$

β	FS MEDIO	PF
5,00	2,58	2,08%
10,00	2,09	4,36%
15,00	1,77	8,09%
20,00	1,55	13,29%
25,00	1,39	19,47%
30,00	1,28	25,76%
35,00	1,21	31,20%
40,00	1,16	35,00%
45,00	1,15	36,68%

Se presenta la (Figura 100) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación para z de 3.5 m, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que no se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989) como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

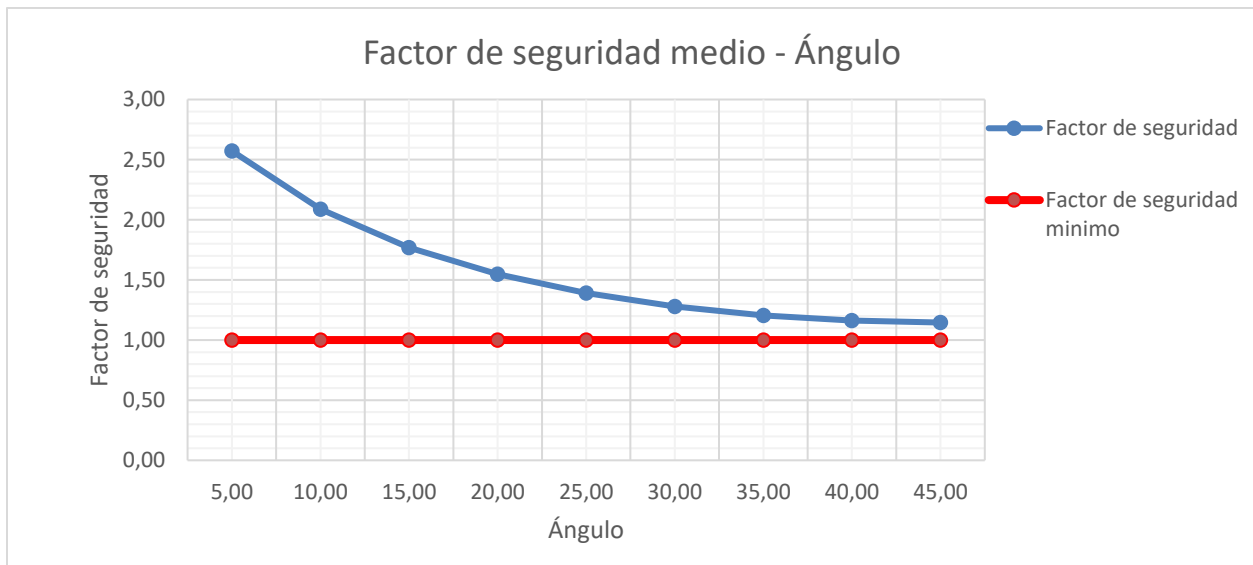


Figura 100. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 101), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Para el caso se tiene una probabilidad de falla superior al 36%.

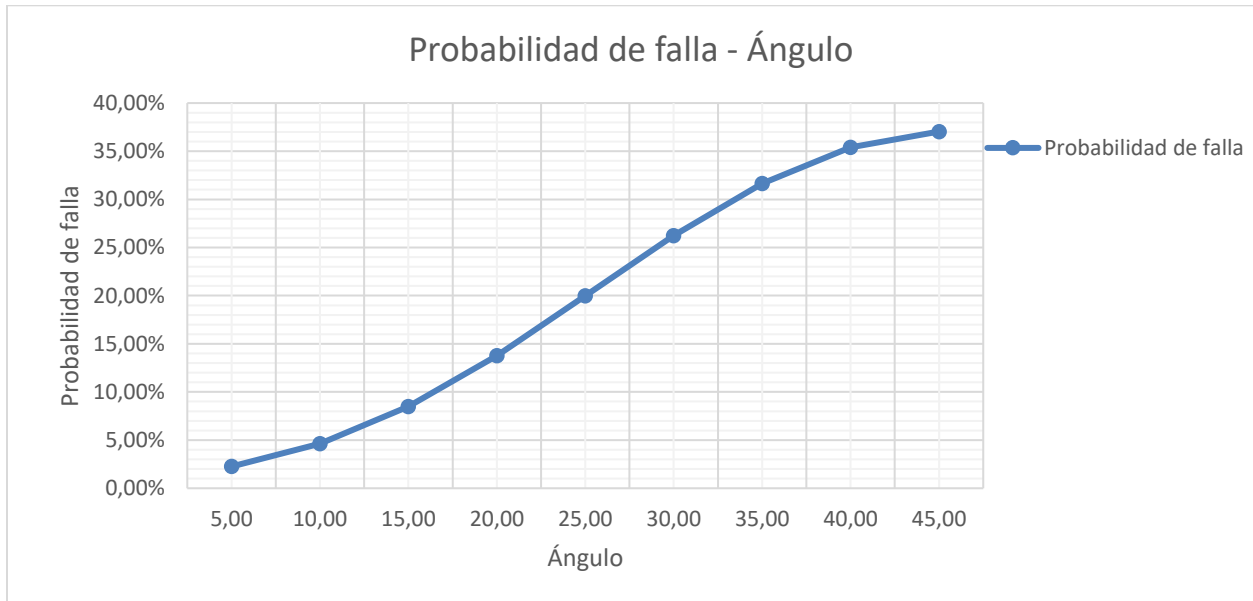


Figura 101. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 4.5 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 58) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S. mínimo de 1.05 y máximo de 2.41. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 2.16% y 45.19%.

Tabla 58. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=4.5m

β	FS MEDIO	PF
5,00	2,41	2,16%
10,00	1,95	4,85%
15,00	1,65	9,46%
20,00	1,44	16,04%
25,00	1,29	23,89%
30,00	1,18	31,80%
35,00	1,11	38,52%
40,00	1,06	43,14%
45,00	1,05	45,19%

Se presenta la (Figura 102) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que algunos factores de seguridad se encuentran por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

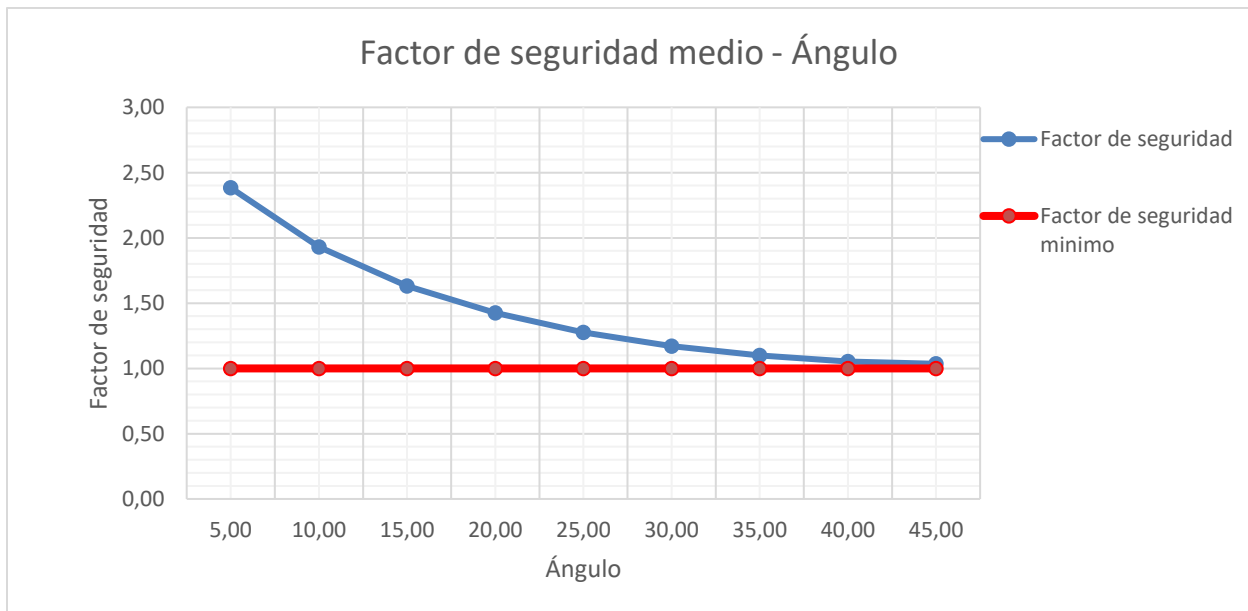


Figura 102. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 103), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Adicionalmente se evidencia que las probabilidades de falla sobrepasan el 45%.

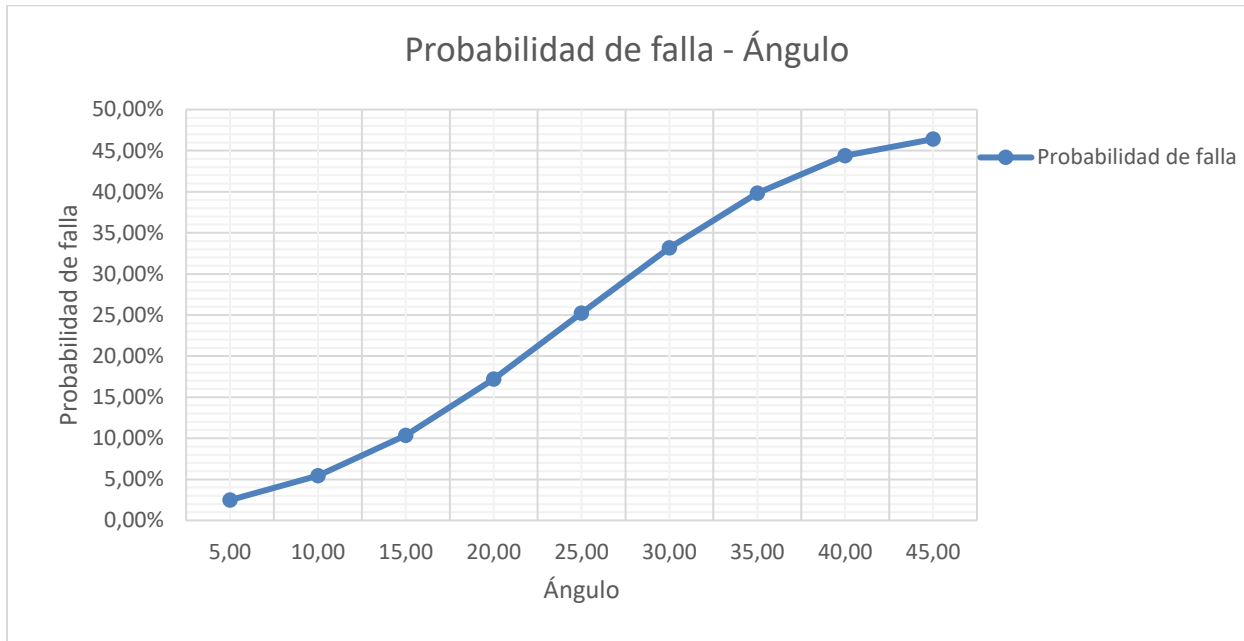


Figura 103. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 5.0 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 59) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S. mínimo de 0.95 y máximo de 2.24. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 2.53% y 55.22%.

Tabla 59. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=5.0m$

β	FS MEDIO	PF
5,00	2,24	2,53%
10,00	1,81	5,97%
15,00	1,53	11,93%
20,00	1,33	20,38%
25,00	1,19	30,25%
30,00	1,09	39,86%
35,00	1,02	47,72%
40,00	0,97	52,95%
45,00	0,95	55,22%

Se presenta la (Figura 104) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que algunos factores de seguridad se encuentran por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

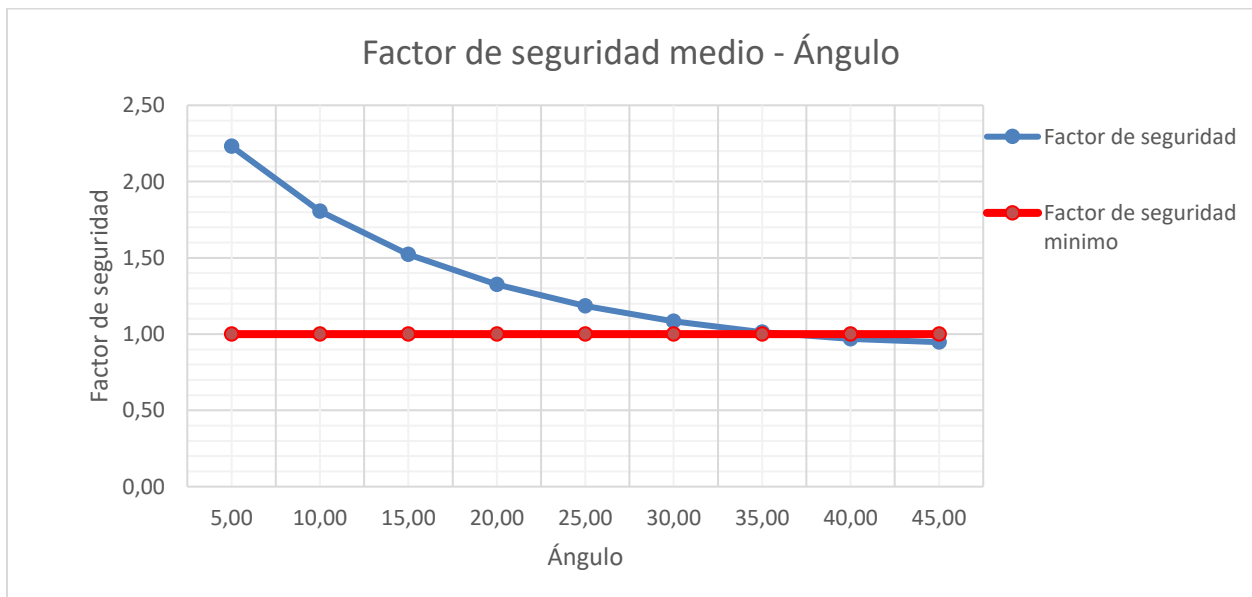


Figura 104. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 105), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Adicionalmente se evidencia que las probabilidades de falla sobrepasan el 50%.

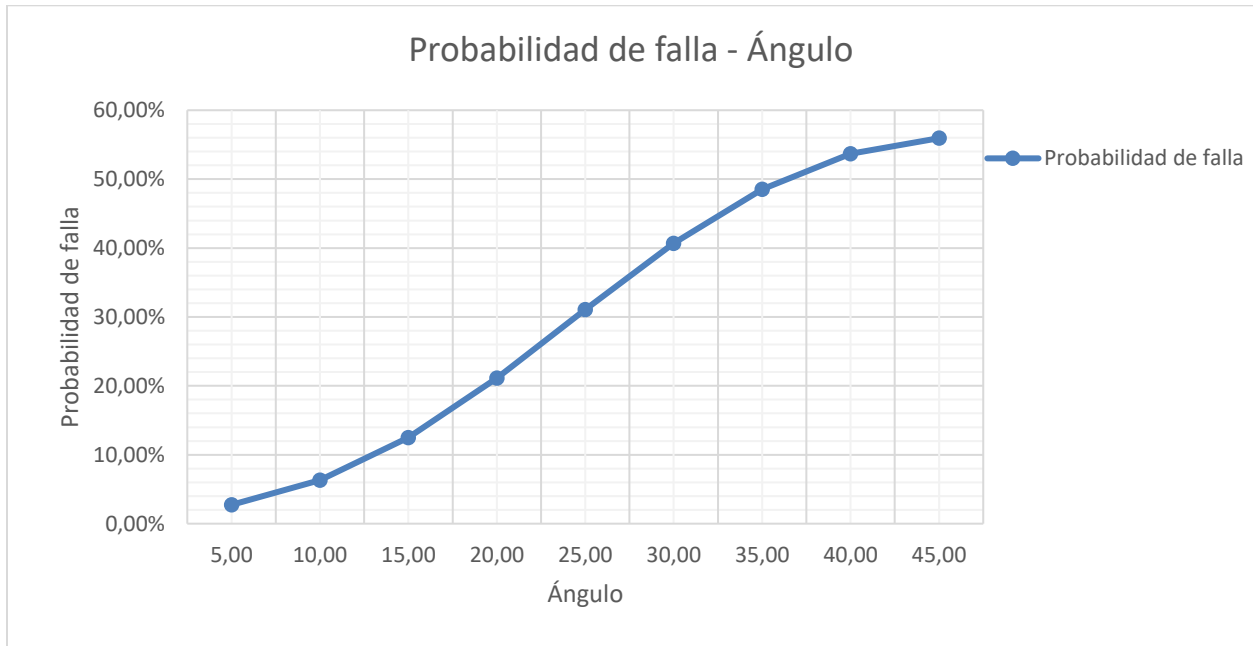


Figura 105. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 5.5 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 60) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S. mínimo de 0.88 y máximo de 2.11. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 3.05% y 65.01%.

Tabla 60. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=5.5m$

β	FS MEDIO	PF
5,00	2,11	3,05%
10,00	1,70	7,39%
15,00	1,44	14,95%
20,00	1,25	25,47%
25,00	1,11	37,33%
30,00	1,01	48,40%
35,00	0,94	57,06%
40,00	0,90	62,62%
45,00	0,88	65,01%

Se presenta la (Figura 106) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que algunos factores de seguridad se encuentran por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

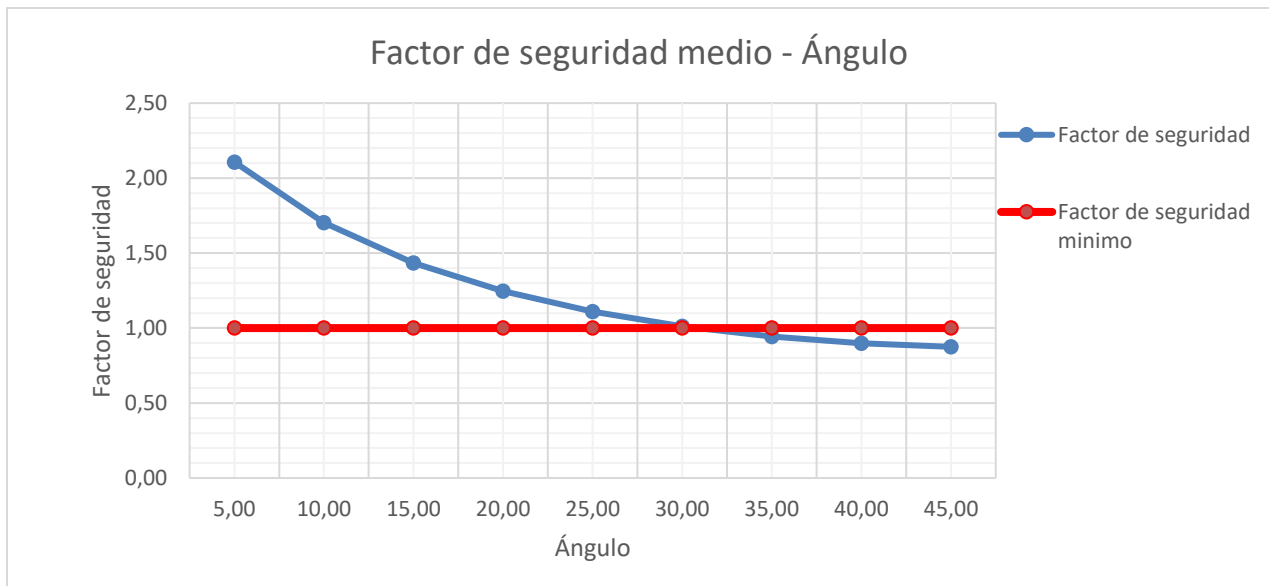


Figura 106. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 107), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Adicionalmente se evidencia que las probabilidades de falla sobrepasan el 60%.

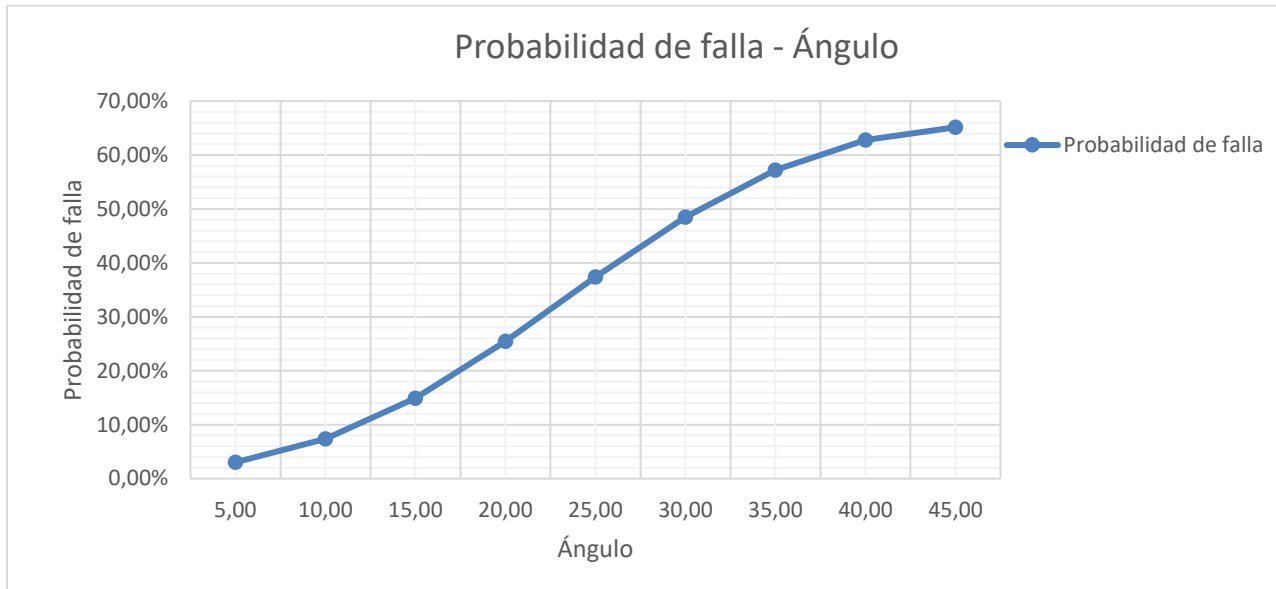


Figura 107. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 6.0 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 61) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S. mínimo de 0.83 y máximo de 2.03. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 3.12% y 71.97%.

Tabla 61. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=6.0m

β	FS MEDIO	PF
5,00	2,03	3,12%
10,00	1,64	7,97%
15,00	1,38	16,63%
20,00	1,19	28,76%
25,00	1,06	42,26%
30,00	0,97	54,49%
35,00	0,90	63,75%
40,00	0,85	69,52%
45,00	0,83	71,97%

Se presenta la (Figura 108) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que algunos factores de seguridad se encuentran por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

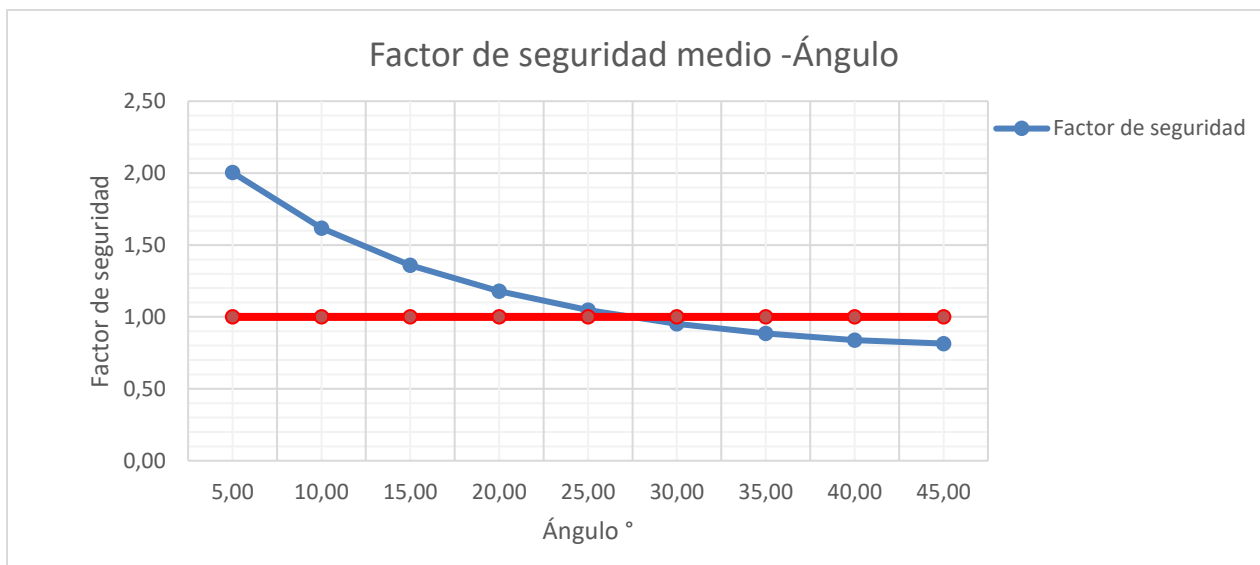


Figura 108. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 109), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Adicionalmente se evidencia que las probabilidades de falla sobrepasan el 70%.

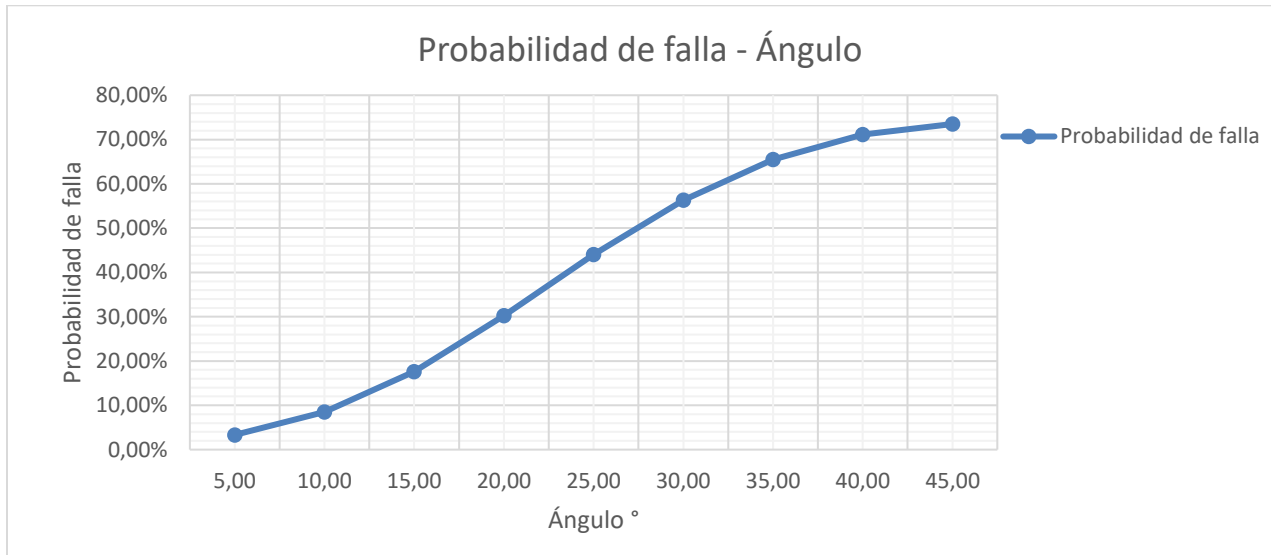


Figura 109. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 6.5 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 62) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S. mínimo de 0.77 y máximo de 1.93. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 3.54% y 79.59%.

Tabla 62. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=6.5m$

β	FS MEDIO	PF
5,00	1,93	3,54%
10,00	1,56	9,37%
15,00	1,31	19,82%
20,00	1,13	34,12%
25,00	1,00	49,36%
30,00	0,91	62,44%
35,00	0,84	71,77%
40,00	0,80	77,30%
45,00	0,77	79,59%

Se presenta la (Figura 110) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que algunos factores de seguridad se encuentran por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

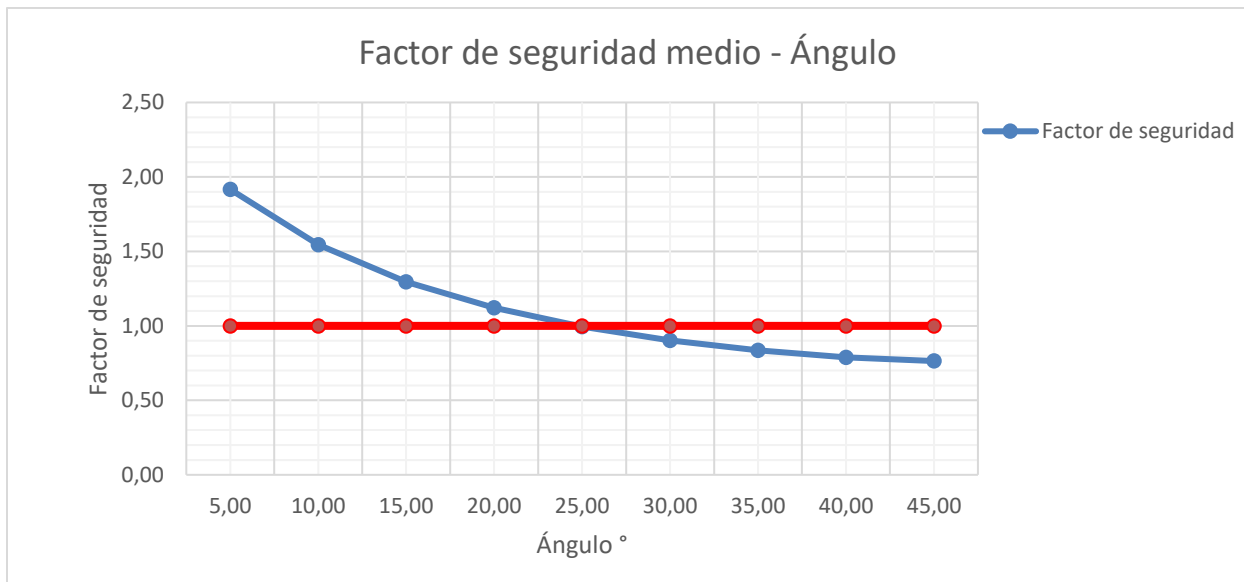


Figura 110. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 111), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Adicionalmente se evidencia que las probabilidades de falla son cercanas al 80%.

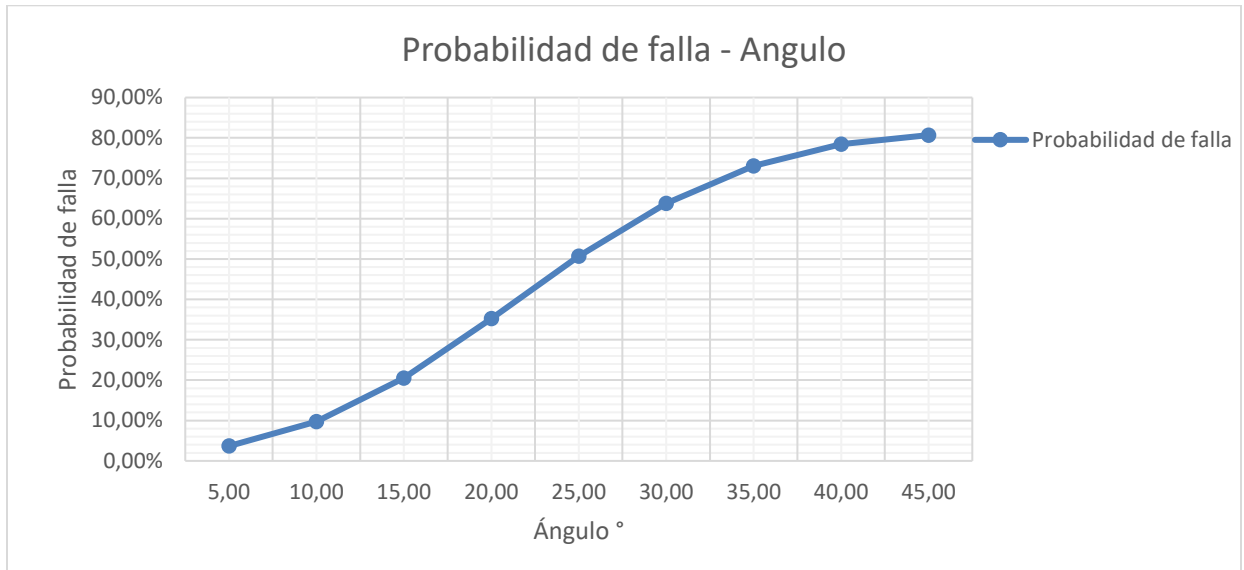


Figura 111. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 7.0 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 63) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S. mínimo de 0.73 y máximo de 1.86. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 4.17% y 85.77%.

Tabla 63. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=7.0m$

β	FS MEDIO	PF
5,00	1,86	4,17%
10,00	1,49	11,09%
15,00	1,25	23,28%
20,00	1,08	39,45%
25,00	0,96	55,93%
30,00	0,87	69,32%
35,00	0,80	78,35%
40,00	0,75	83,47%
45,00	0,73	85,57%

Se presenta la (Figura 112) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que algunos factores de seguridad se encuentran por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

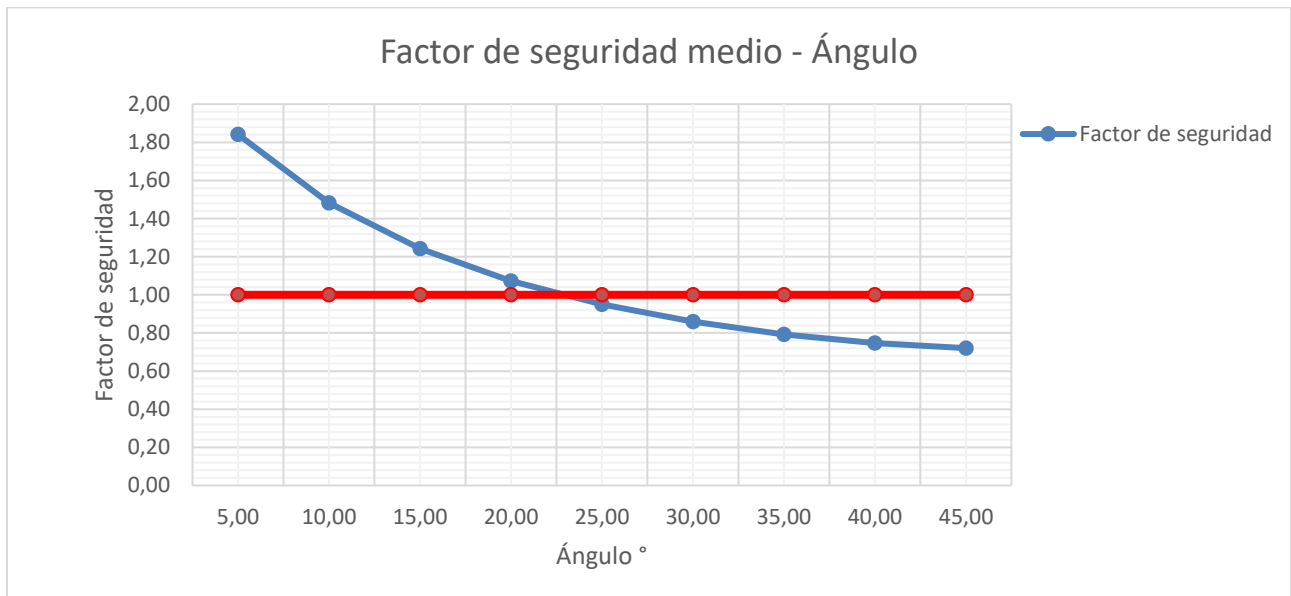


Figura 112. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 113), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Adicionalmente se evidencia que las probabilidades de falla sobrepasan el 80%.

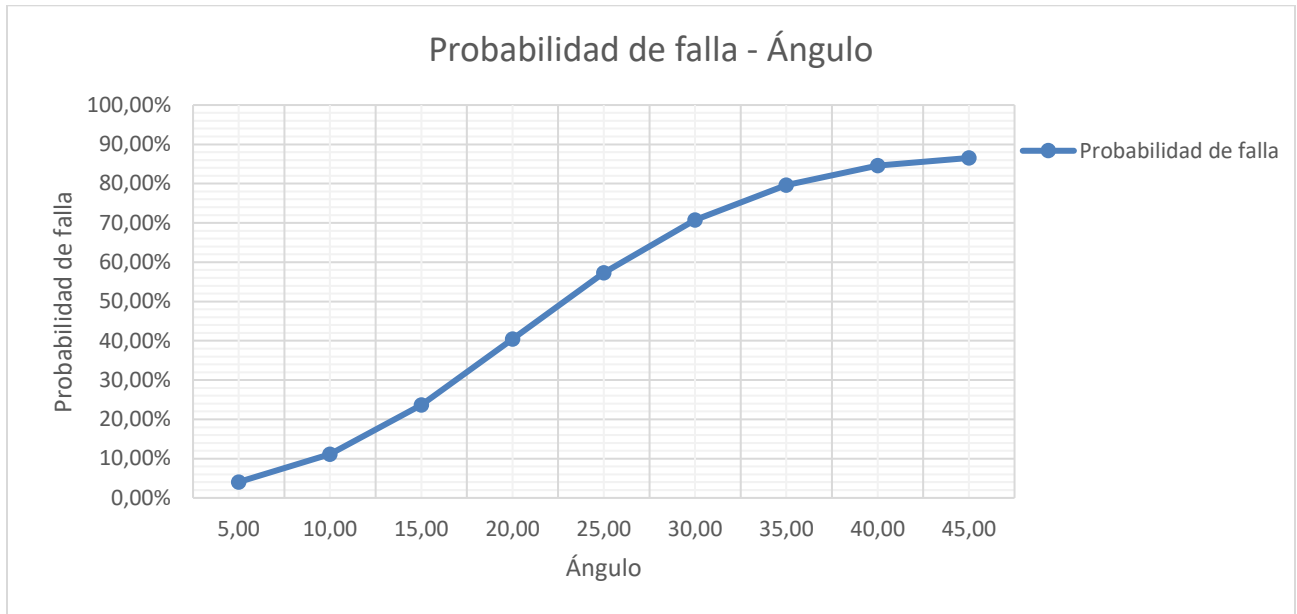


Figura 113. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 7.5 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 64) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S. mínimo de 0.69 y máximo de 1.79. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 4.00% y 90.95%.

Tabla 64. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=7.5m$

β	FS MEDIO	PF
5,00	1,79	4,00%
10,00	1,44	11,68%
15,00	1,20	25,83%
20,00	1,04	44,51%
25,00	0,92	62,70%
30,00	0,83	76,40%
35,00	0,76	84,84%
40,00	0,72	89,25%
45,00	0,69	90,95%

Se presenta la (Figura 114) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que algunos factores de seguridad se encuentran por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

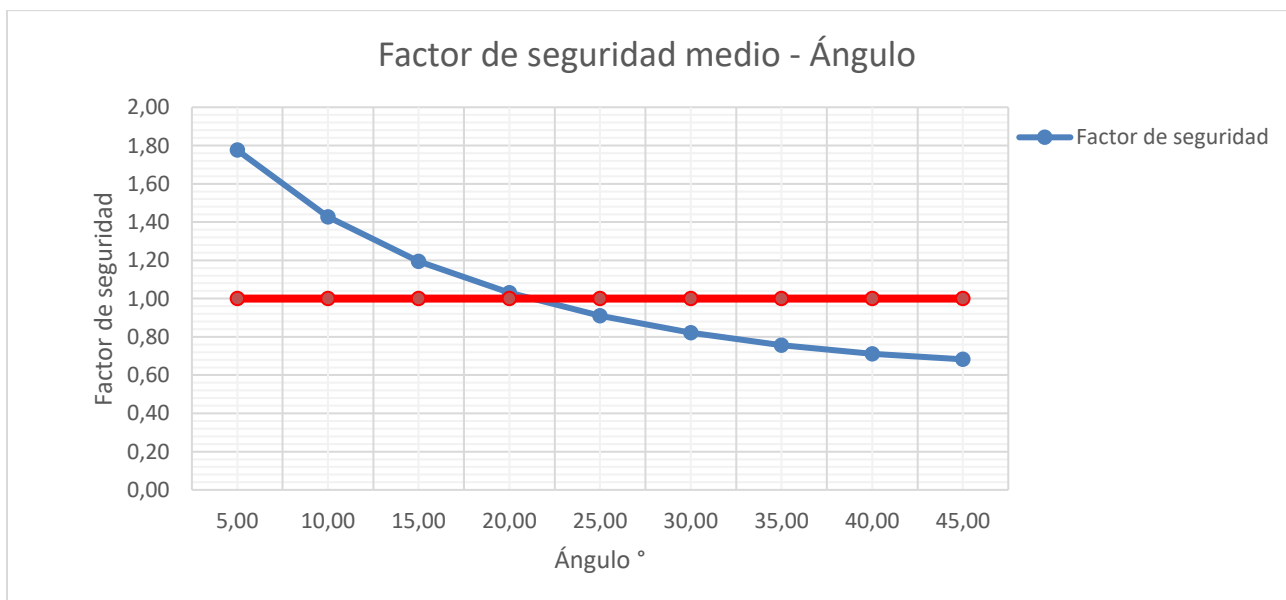


Figura 114. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 115), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Adicionalmente se evidencia que las probabilidades de falla sobrepasan el 90%.

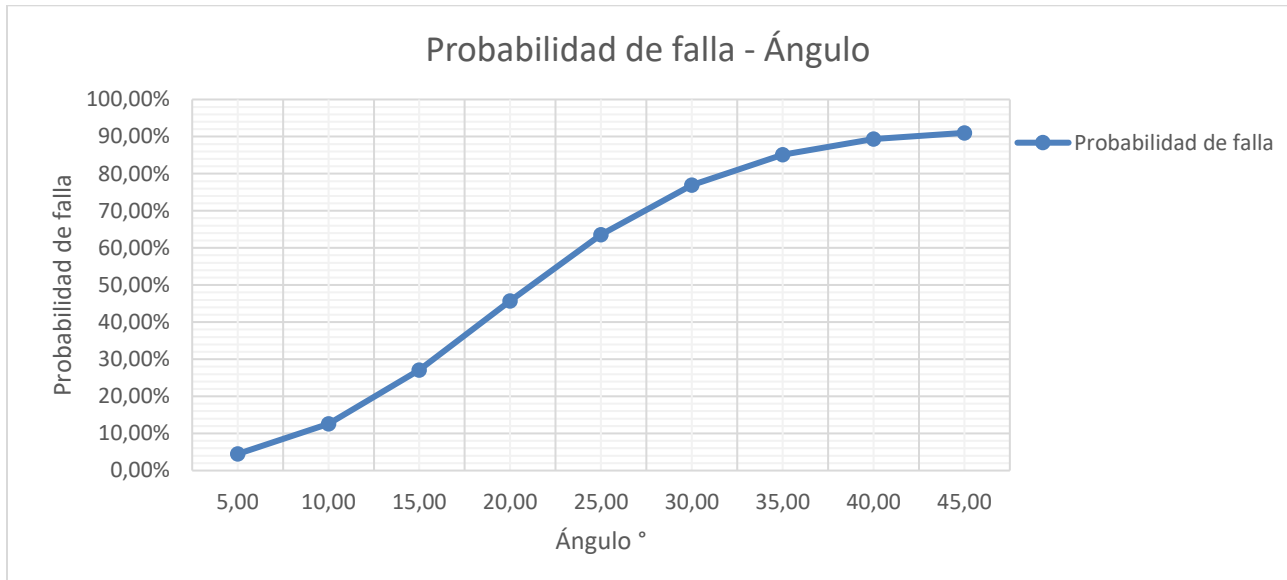


Figura 115. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 8.0 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 65) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S. mínimo de 0.69 y máximo de 1.74. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 4.50% y 93.73%.

Tabla 65. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=8.0m

β	FS MEDIO	PF
5,00	1,74	4,50%
10,00	1,40	13,13%
15,00	1,17	28,77%
20,00	1,01	48,80%
25,00	0,89	67,46%
30,00	0,80	80,76%
35,00	0,74	88,48%
40,00	0,69	92,29%
45,00	0,66	93,73%

Se presenta la (Figura 116) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que algunos factores de seguridad se encuentran por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

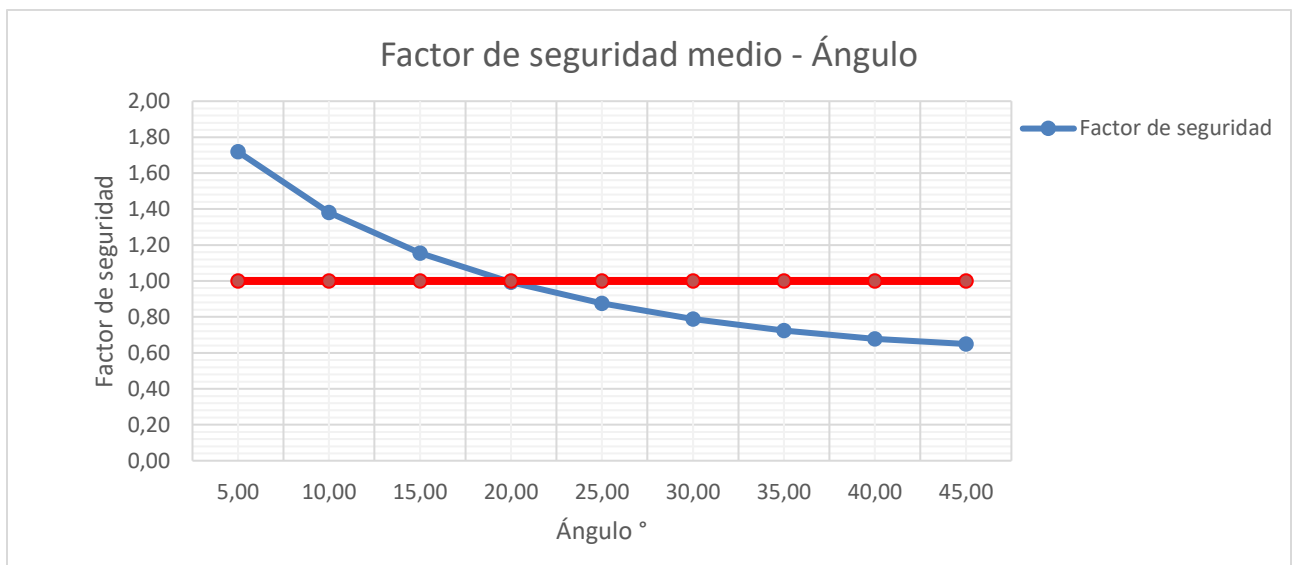


Figura 116. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 117), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Adicionalmente se evidencia que las probabilidades de falla sobrepasan el 90%.

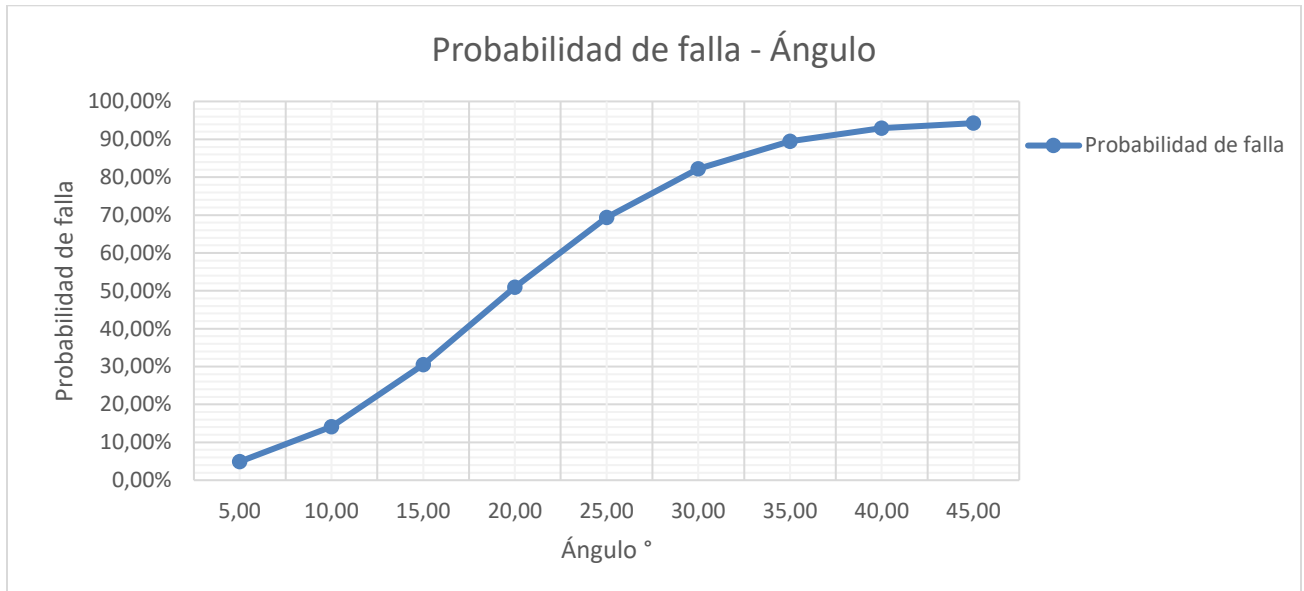


Figura 117. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 8.5 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 66) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S. mínimo de 0.62 y máximo de 1.68. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 5.35% y 96.37%.

Tabla 66. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=8.5m

β	FS MEDIO	PF
5,00	1,68	5,35%
10,00	1,35	15,59%
15,00	1,12	33,54%
20,00	0,97	55,24%
25,00	0,85	73,92%
30,00	0,76	86,04%
35,00	0,70	92,42%
40,00	0,65	95,32%
45,00	0,62	96,37%

Se presenta la (Figura 118) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que algunos factores de seguridad se encuentran por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

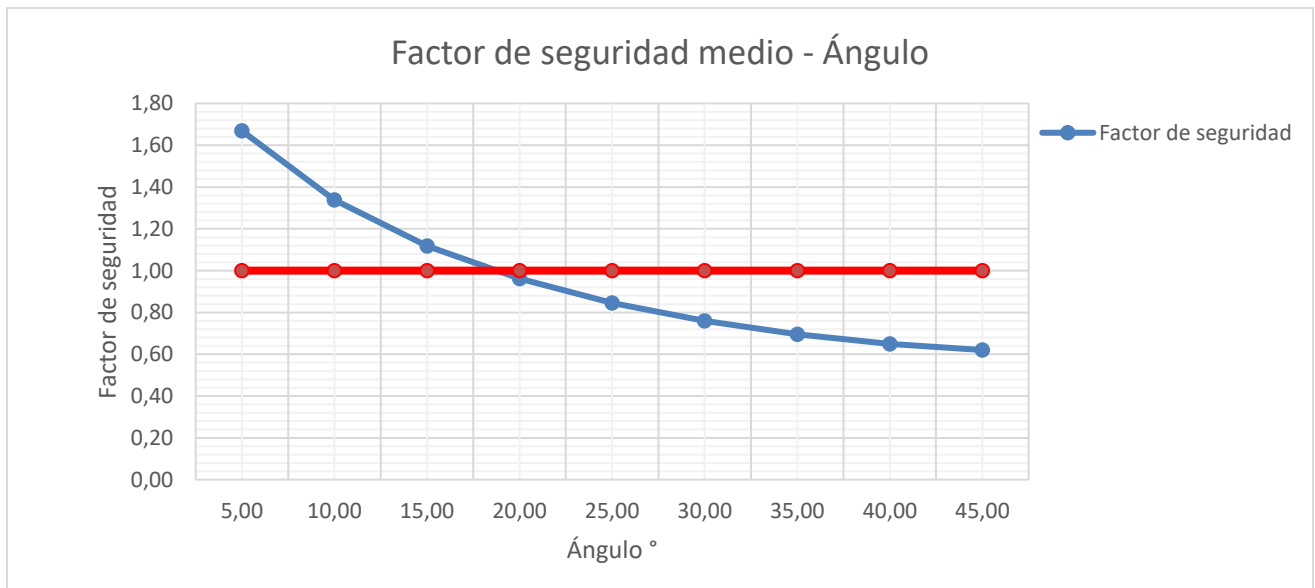


Figura 118. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 119), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Adicionalmente se evidencia que las probabilidades de falla sobrepasan el 95%.

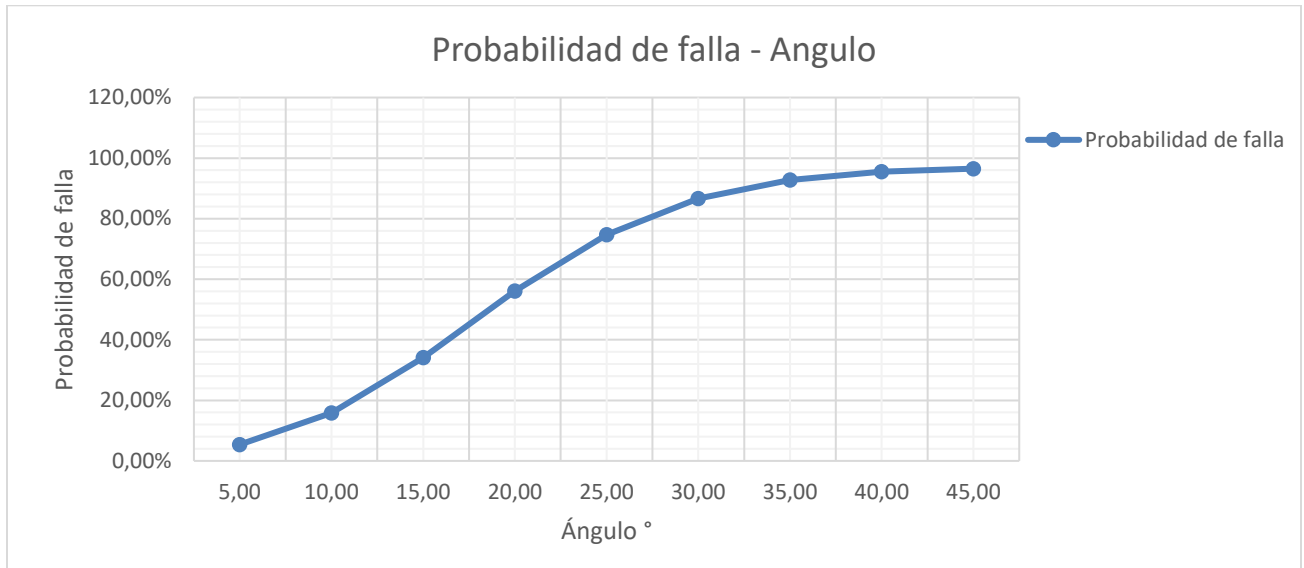


Figura 119. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo sin tabla de agua, espesor del estrato de 9.0 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 67) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S. mínimo de 0.59 y máximo de 1.63. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 5.35% y 96.37%.

Tabla 67. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=9.0m

β	FS MEDIO	PF
5,00	1,63	5,88%
10,00	1,31	17,45%
15,00	1,09	37,42%
20,00	0,93	60,54%
25,00	0,82	79,06%
30,00	0,74	89,98%
35,00	0,67	95,15%
40,00	0,63	97,28%
45,00	0,59	98,01%

Se presenta la (Figura 120) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que algunos factores de seguridad se encuentran por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989), como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

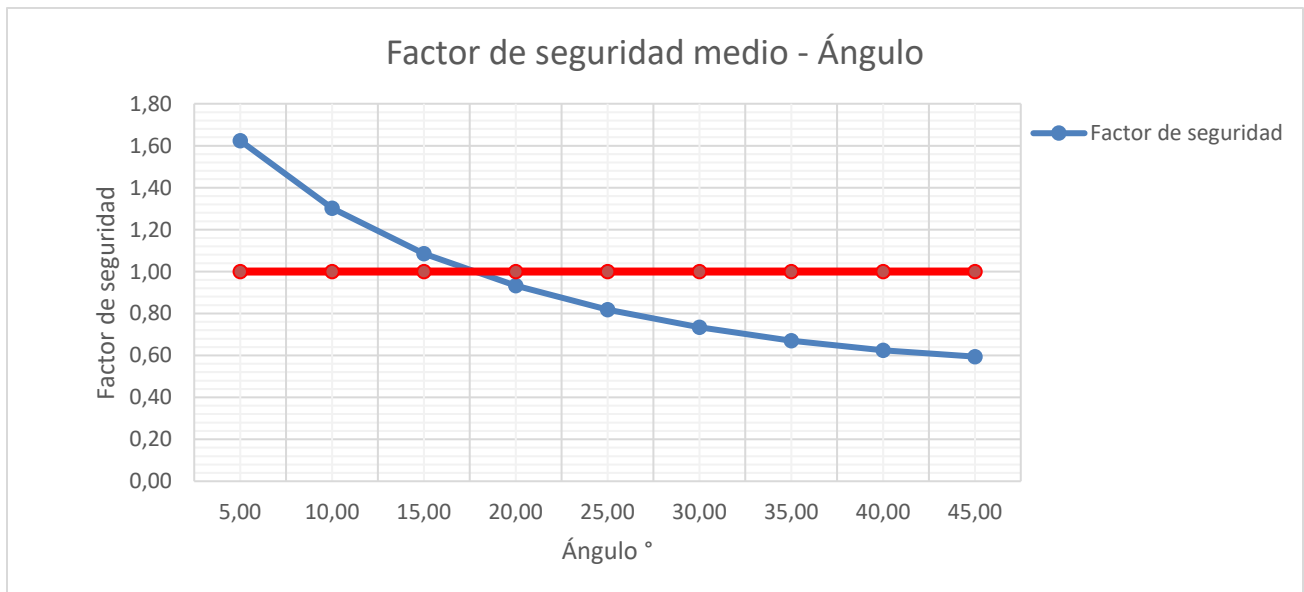


Figura 120. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 121), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando. Adicionalmente se evidencia que las probabilidades de falla sobrepasan el 98%.

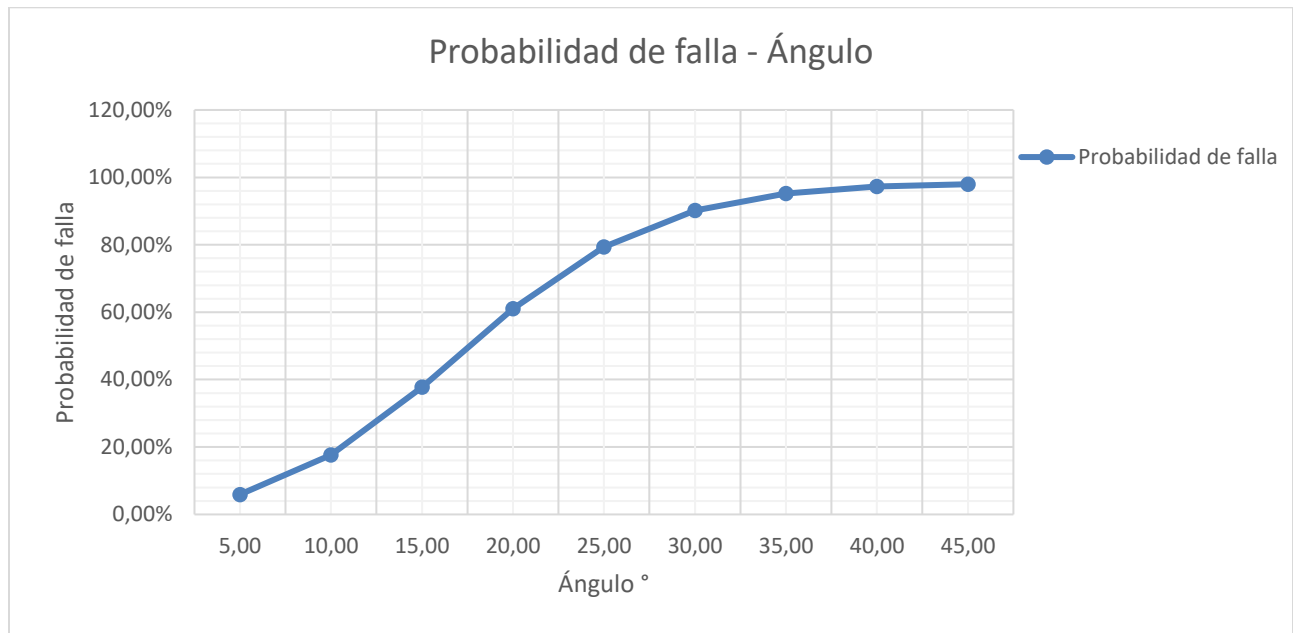


Figura 121. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud

10.7. Anexo síntesis método de Montecarlo 5000 iteraciones altura de agua del 100%.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo con tabla de agua al 100% del espesor del estrato blando, alturas del estrato blando de 1.0 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 68) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 4.05 y máximo de 7.38. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 1.81% y 4.22%.

Tabla 68. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=1.0m

β	FS MEDIO	PF
5,00	7,38	1,81%
10,00	6,07	2,20%
15,00	5,24	2,63%
20,00	4,69	3,07%
25,00	4,33	3,48%
30,00	4,10	3,83%
35,00	3,99	4,08%
40,00	3,97	4,22%
45,00	4,05	4,22%

Se presenta la (Figura 122) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que no se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989) como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

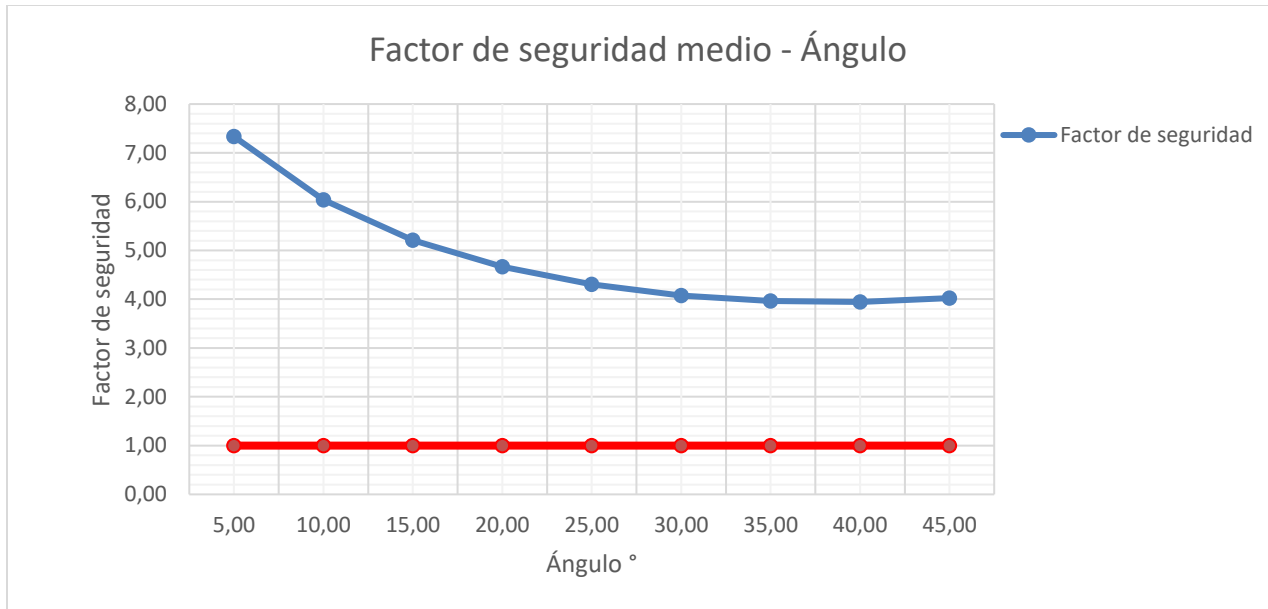


Figura 122. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 123), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando, para el caso se tiene una probabilidad de falla superior al 4%.

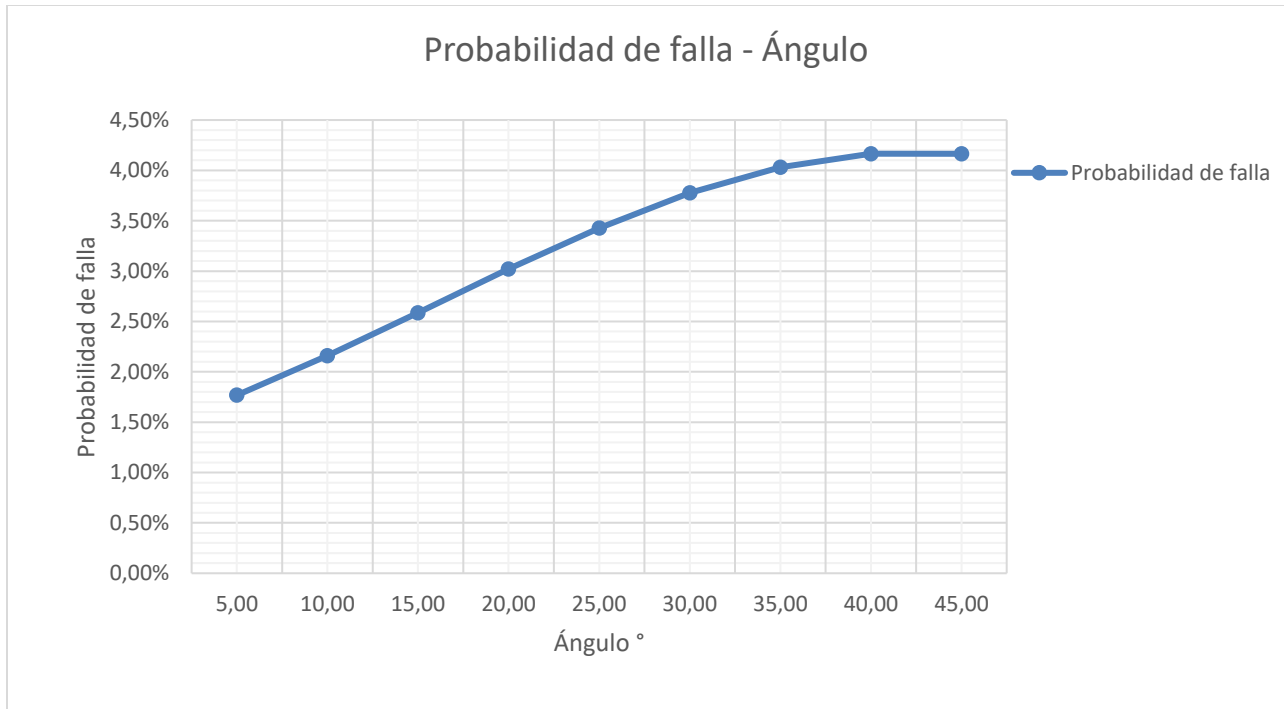


Figura 123. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo con tabla de agua al 100% del espesor del estrato blando, alturas del estrato blando de 1.5 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 69) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 2.67 y máximo de 5.05. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 2.19% y 7.25%.

Tabla 69. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=1.5m

β	FS MEDIO	PF
5,00	5,05	2,19%
10,00	4,14	2,92%
15,00	3,57	3,77%
20,00	3,18	4,68%
25,00	2,92	5,57%
30,00	2,76	6,35%
35,00	2,67	6,94%
40,00	2,65	7,25%
45,00	2,70	7,25%

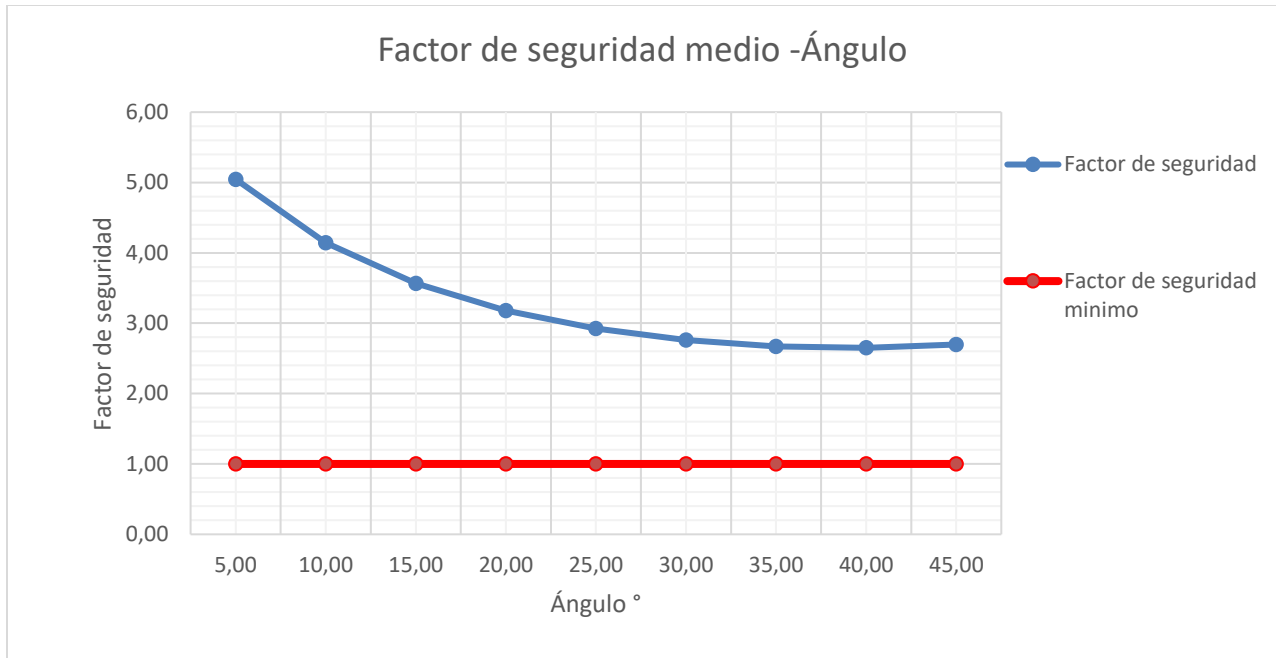


Figura 124. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo con tabla de agua al 100% del espesor del estrato blando, alturas del estrato blando de 2.0 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 70) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 2.02 y máximo de 3.93. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 2.58% y 11.50%.

Tabla 70. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=2.0m$

β	FS MEDIO	PF
5,00	3,93	2,58%
10,00	3,22	3,74%
15,00	2,77	5,16%
20,00	2,46	6,76%
25,00	2,25	8,37%
30,00	2,12	9,81%
35,00	2,04	10,90%
40,00	2,02	11,49%
45,00	2,05	11,50%

Se presenta la (Figura 125) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que no se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989) como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

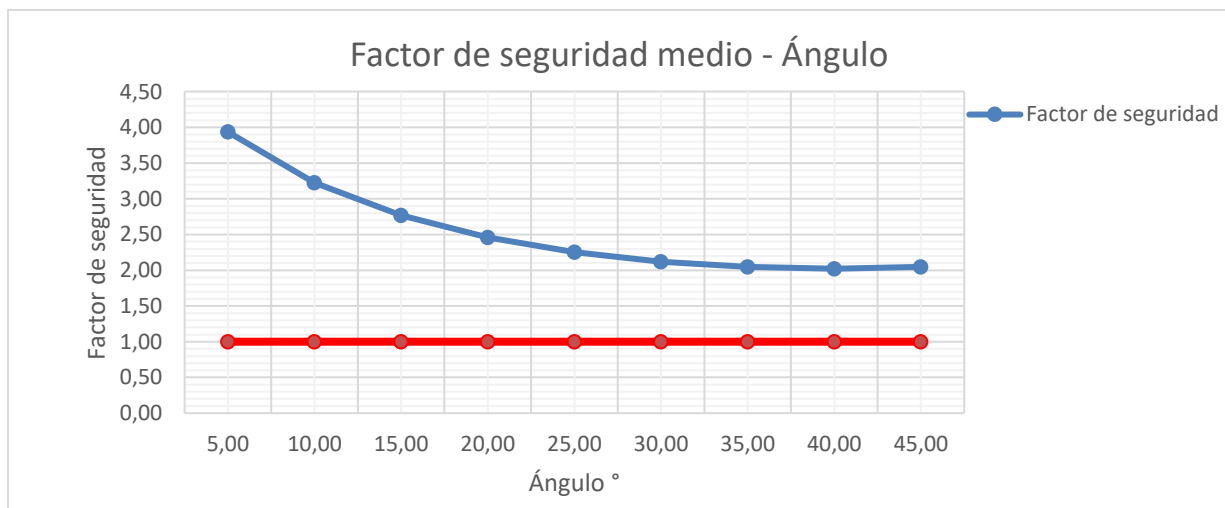


Figura 125. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 126), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando, para el caso se tiene una probabilidad de falla superior al 10%.

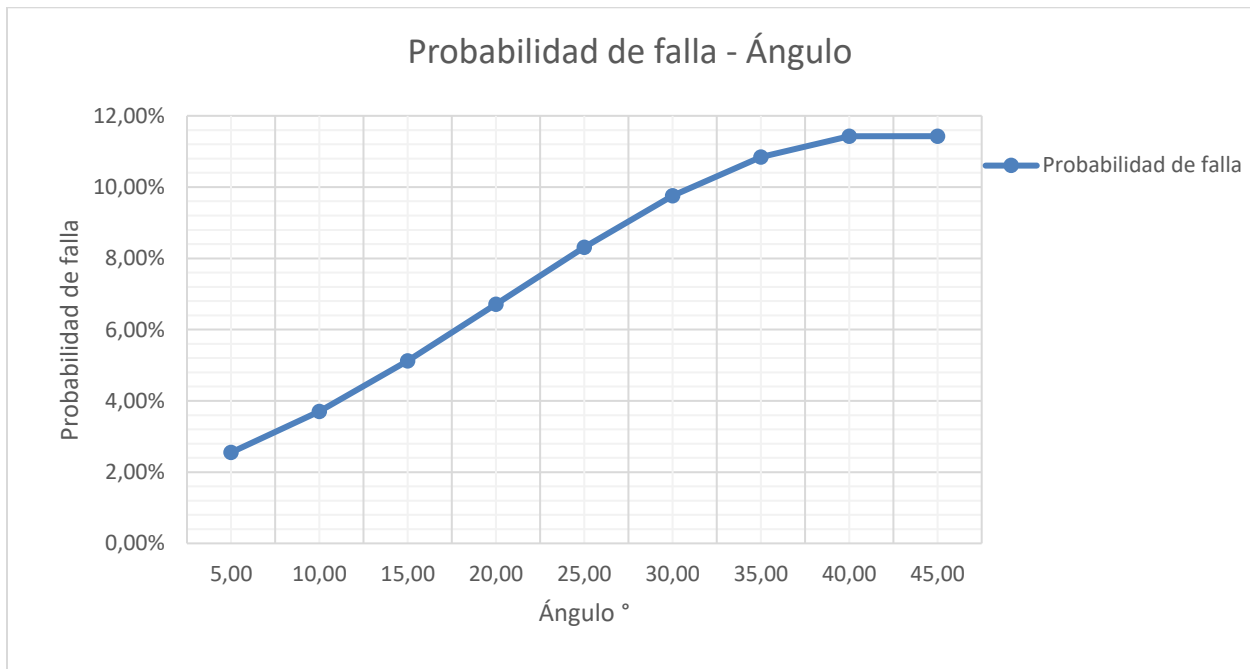


Figura 126. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo con tabla de agua al 100% del espesor del estrato blando, alturas del estrato blando de 2.5 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 71) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 1.62 y máximo de 3.22. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 3.16% y 17.94%.

Tabla 71. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=2.5m$

β	FS MEDIO	PF
5,00	3,22	3,16%
10,00	2,63	4,95%
15,00	2,25	7,25%
20,00	1,99	9,89%
25,00	1,82	12,62%
30,00	1,71	15,08%
35,00	1,64	16,93%
40,00	1,62	17,93%
45,00	1,63	17,94%

Se presenta la (Figura 127) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que no se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989) como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

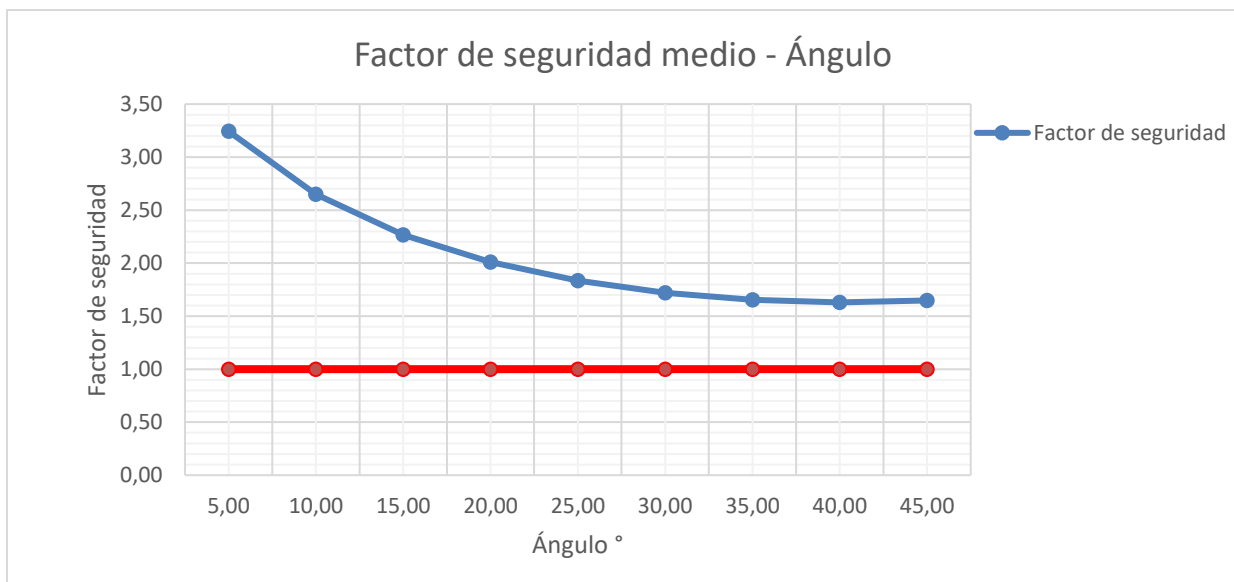


Figura 127. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 112), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando, para el caso se tiene una probabilidad de falla superior al 15%.

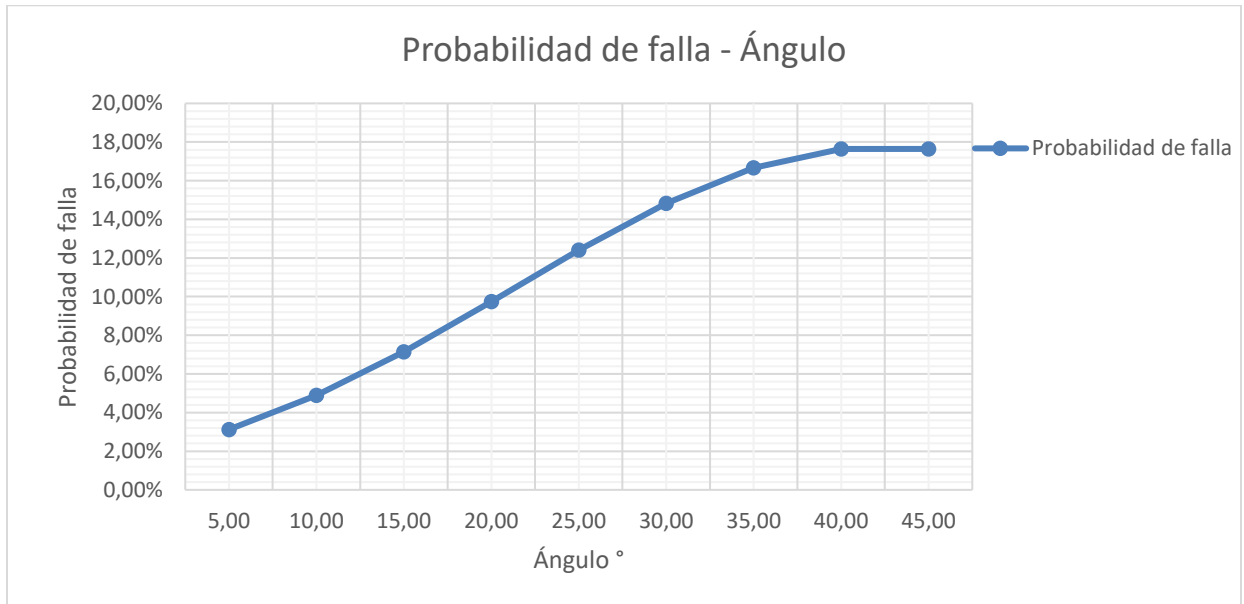


Figura 128. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo con tabla de agua al 100% del espesor del estrato blando, alturas del estrato blando de 3.0 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 72) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 1.37 y máximo de 2.78. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 3.69% y 25.69%.

Tabla 72. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=3.0m$

β	FS MEDIO	PF
5,00	2,78	3,69%
10,00	2,27	6,20%
15,00	1,93	9,56%
20,00	1,71	13,52%
25,00	1,56	17,62%
30,00	1,45	21,32%
35,00	1,39	24,09%
40,00	1,37	25,58%
45,00	1,38	25,59%

Se presenta la (Figura 129) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que no se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989) como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

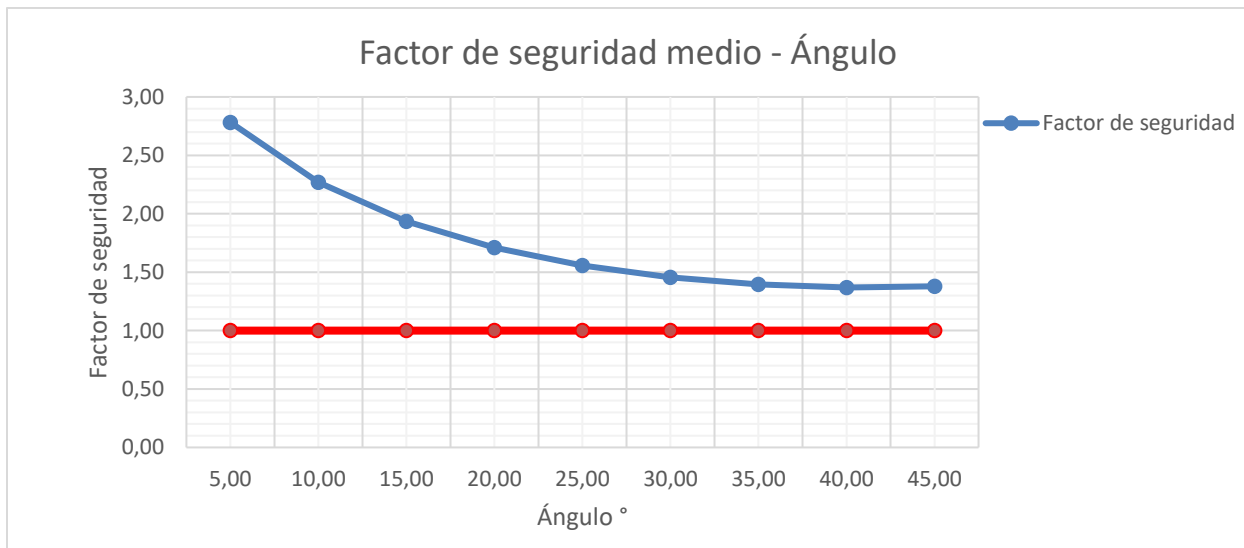


Figura 129. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 130), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando, para el caso se tiene una probabilidad de falla superior al 25%.

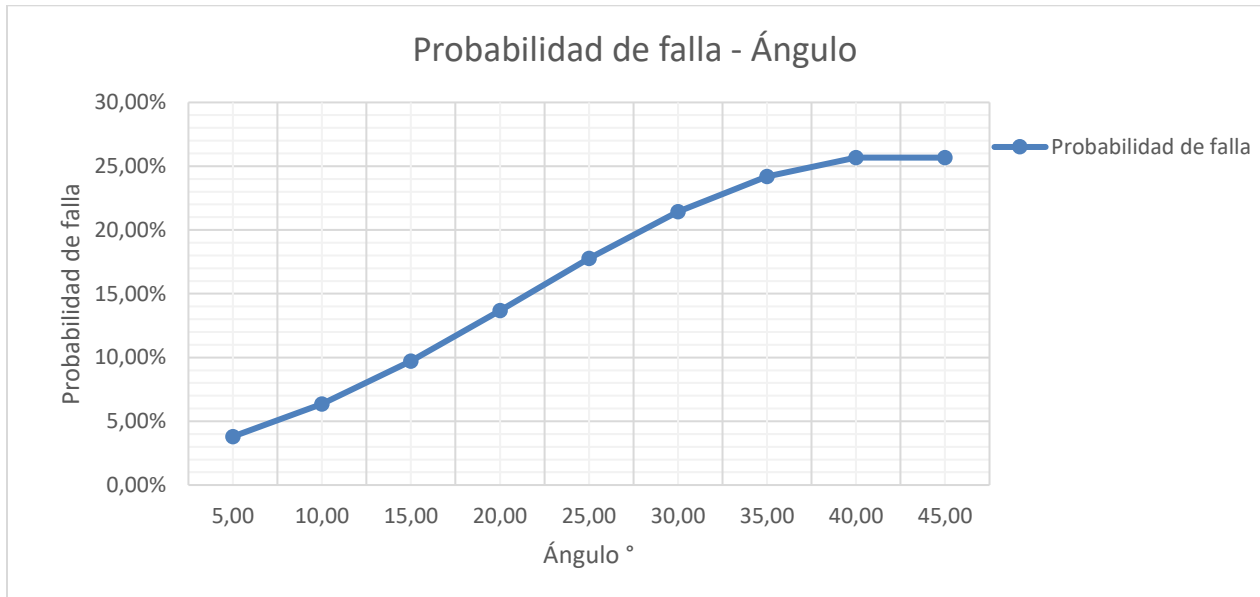


Figura 130. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo con tabla de agua al 100% del espesor del estrato blando, alturas del estrato blando de 3.5 m y demás parámetros de entrada descritos en la (Tabla 73) se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 61) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 1.17 y máximo de 2.44. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 4.74% y 35.85%.

Tabla 73. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=3.5m$

β	FS MEDIO	PF
5,00	2,44	4,74%
10,00	1,98	8,36%
15,00	1,69	13,25%
20,00	1,49	19,00%
25,00	1,35	24,87%
30,00	1,26	30,05%
35,00	1,20	33,86%
40,00	1,17	35,86%
45,00	1,18	35,85%

Se presenta la (Figura 131) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que no se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989) como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

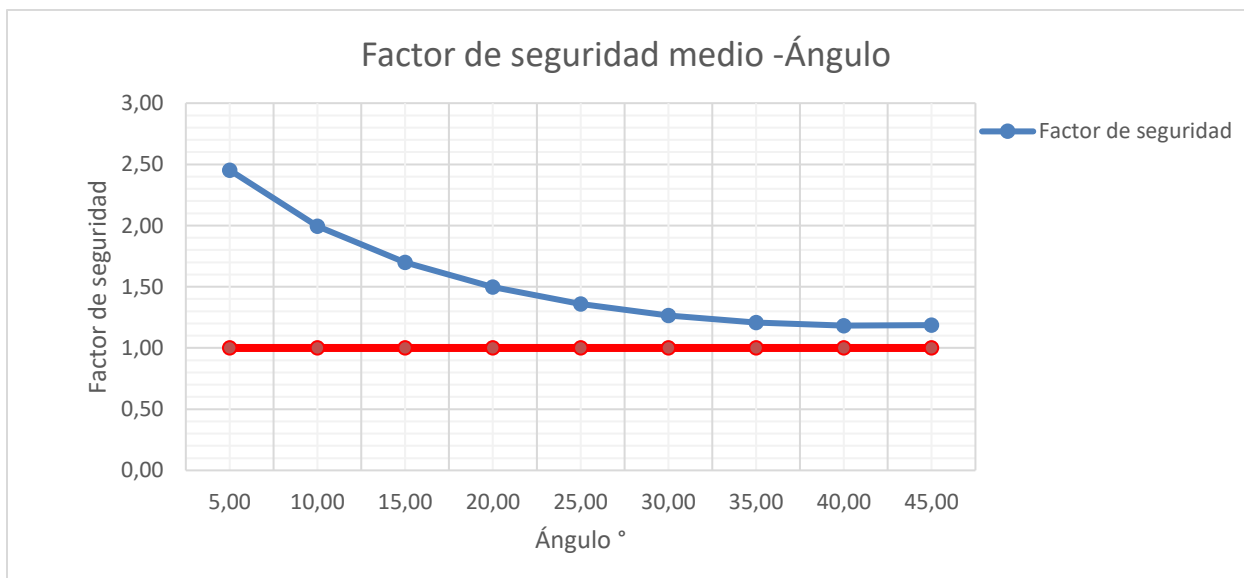


Figura 131. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 132), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando, para el caso se tiene una probabilidad de falla superior al 35%.

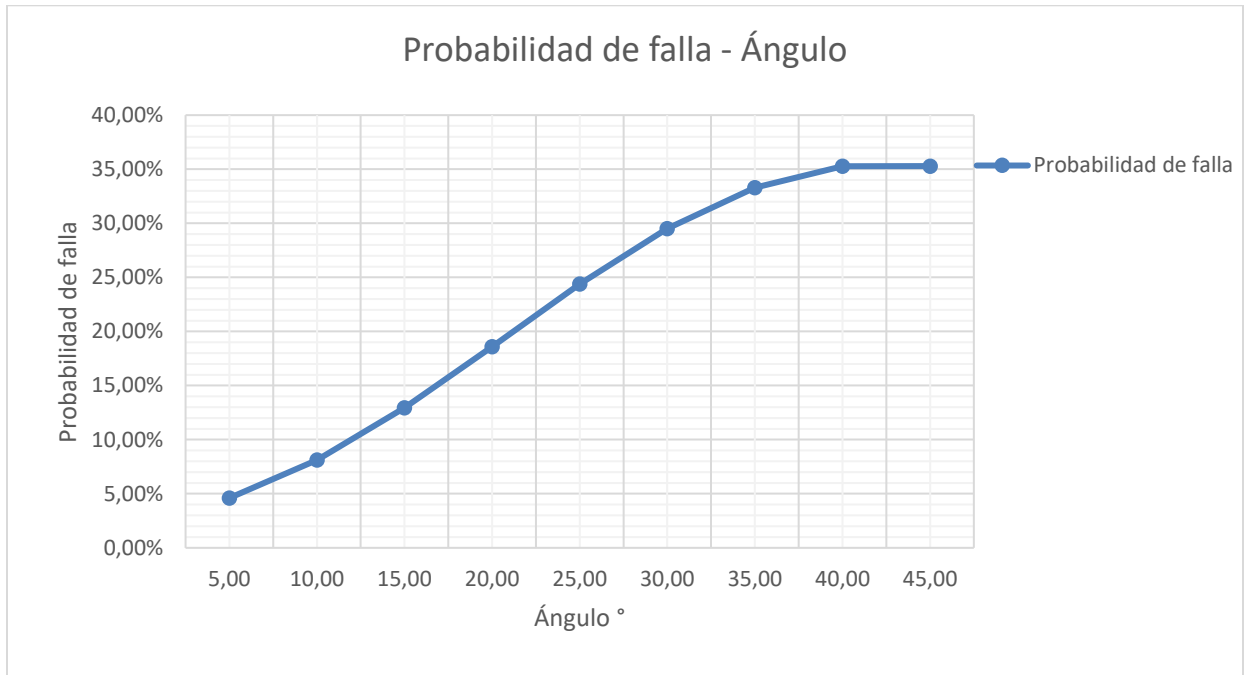


Figura 132. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo con tabla de agua al 100% del espesor del estrato blando, alturas del estrato blando de 4.0 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 74) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 1.04 y máximo de 2.21. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 5.40% y 45.91%.

Tabla 74. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=4.0m$

β	FS MEDIO	PF
5,00	2,21	5,40%
10,00	1,79	10,10%
15,00	1,52	16,62%
20,00	1,34	24,30%
25,00	1,21	32,01%
30,00	1,12	38,65%
35,00	1,07	43,43%
40,00	1,04	45,90%
45,00	1,04	45,91%

Se presenta la (Figura 133) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que no se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989) como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

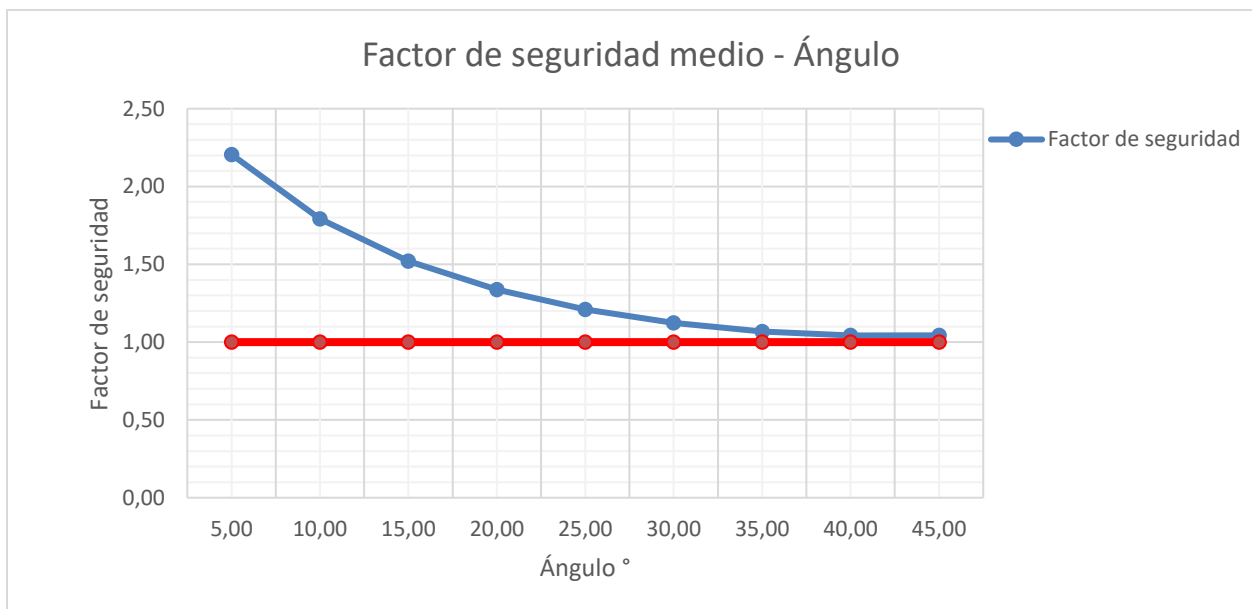


Figura 133. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 134), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando, para el caso se tiene una probabilidad de falla superior al 45%.

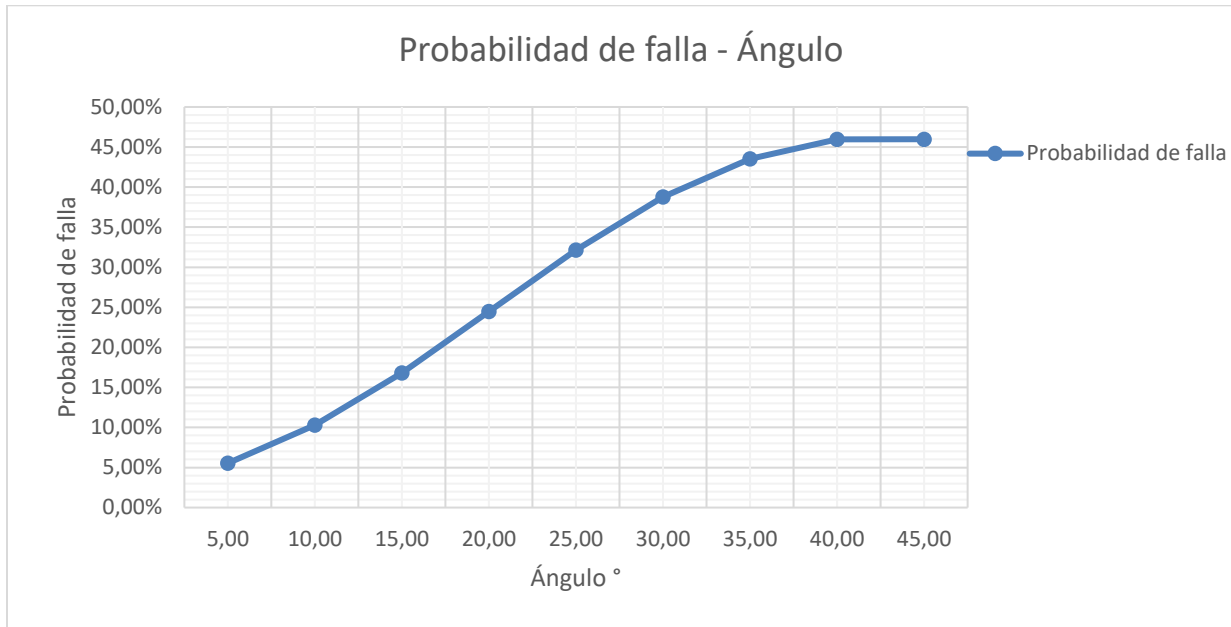


Figura 134. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo con tabla de agua al 100% del espesor del estrato blando, alturas del estrato blando de 4.5 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 75) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 0.93 y máximo de 2.00. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 6.95% y 57.47%.

Tabla 75. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=4.5m$

β	FS MEDIO	PF
5,00	2,00	6,95%
10,00	1,62	13,28%
15,00	1,38	21,95%
20,00	1,21	31,85%
25,00	1,09	41,40%
30,00	1,01	49,27%
35,00	0,96	54,71%
40,00	0,93	57,46%
45,00	0,93	57,47%

Se presenta la (Figura 135) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989) como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

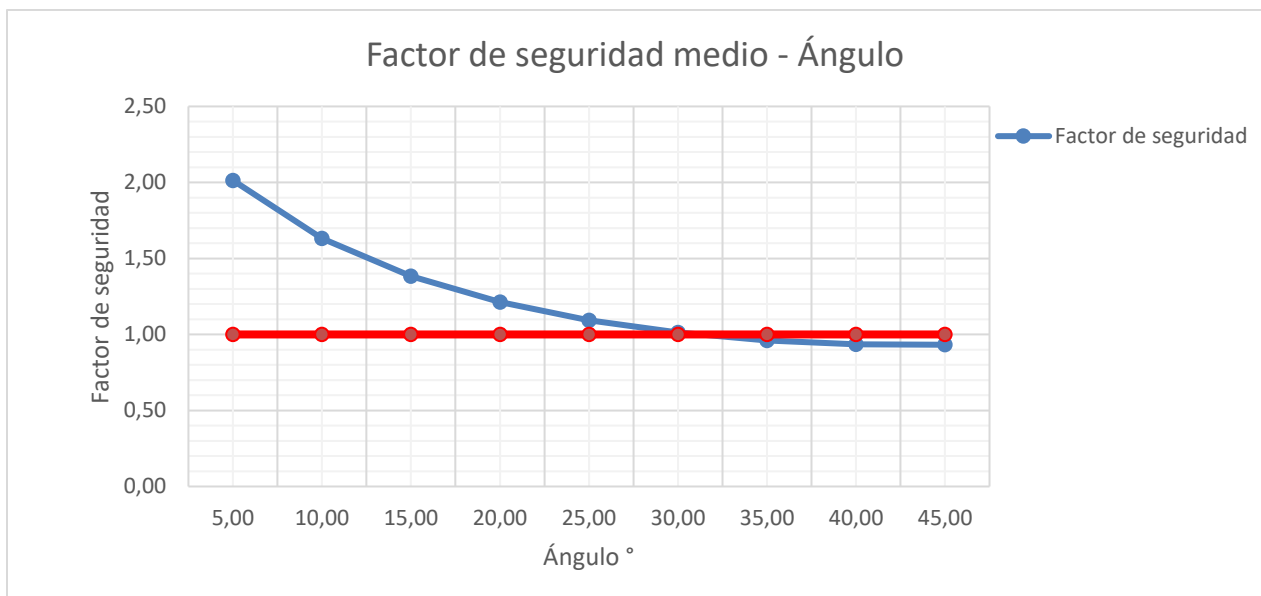


Figura 135. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 136), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando, para el caso se tiene una probabilidad de falla superior al 55%.

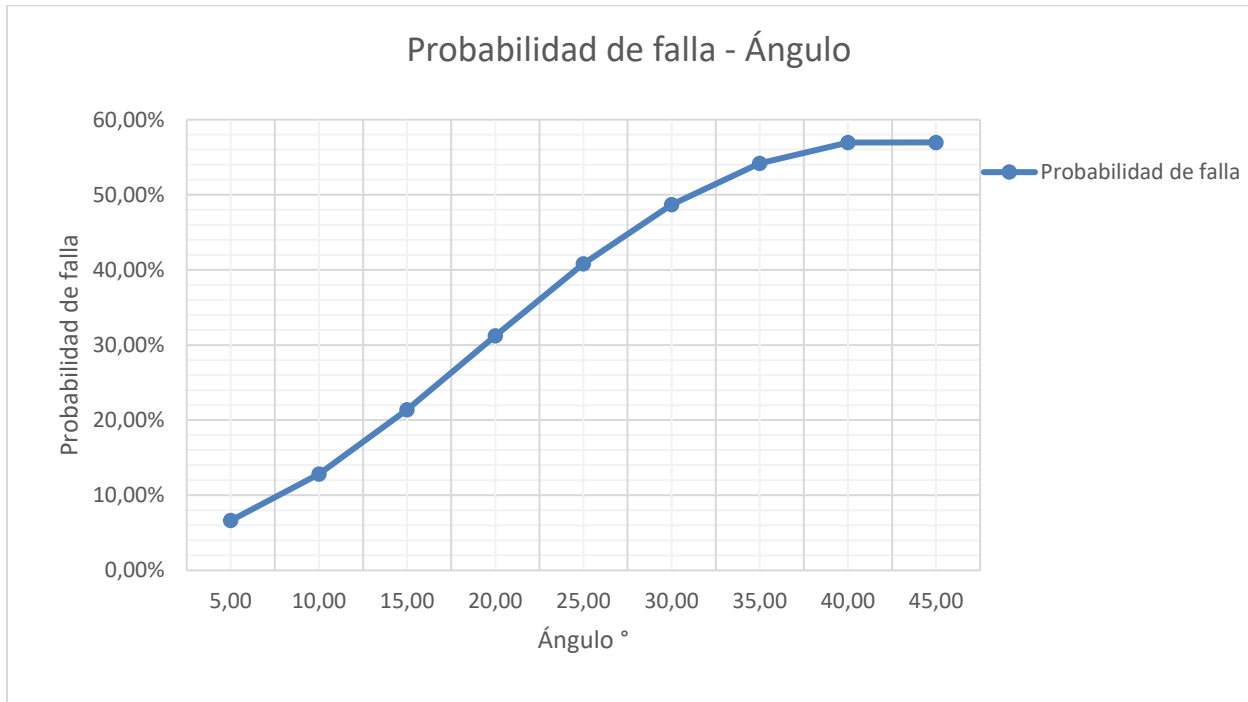


Figura 136. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo con tabla de agua al 100% del espesor del estrato blando, alturas del estrato blando de 5.0 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 76) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 0.85 y máximo de 1.87. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 7.97% y 66.73%.

Tabla 76. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=5.0m$

β	FS MEDIO	PF
5,00	1,87	7,97%
10,00	1,51	15,75%
15,00	1,28	26,39%
20,00	1,12	38,26%
25,00	1,01	49,31%
30,00	0,93	58,04%
35,00	0,88	63,85%
40,00	0,85	66,71%
45,00	0,85	66,73%

Se presenta la (Figura 137) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989) como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

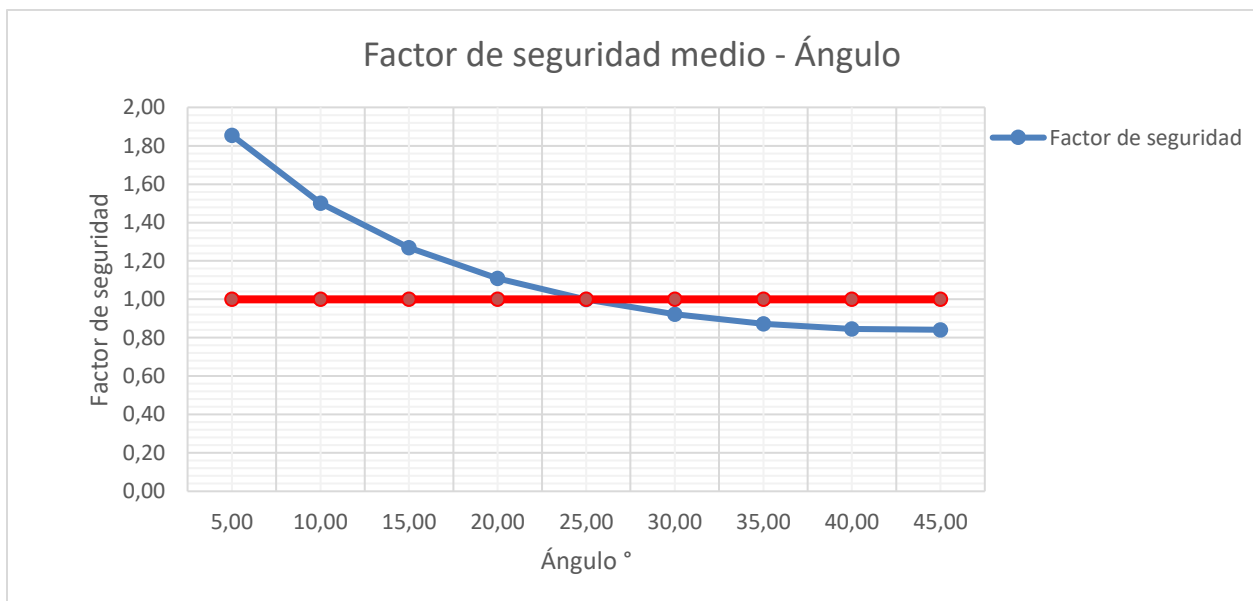


Figura 137. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 138), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando, para el caso se tiene una probabilidad de falla superior al 65%.

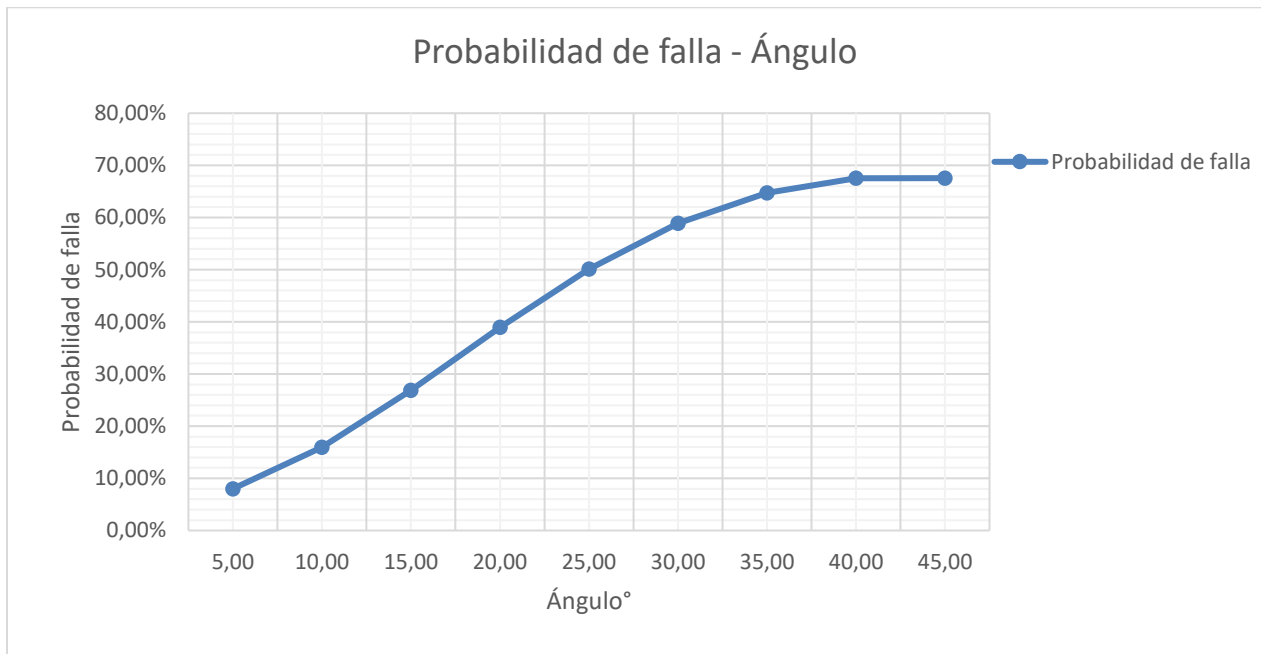


Figura 138. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo con tabla de agua al 100% del espesor del estrato blando, alturas del estrato blando de 5.5 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 77) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 0.78 y máximo de 1.74. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 8.94% y 76.22%.

Tabla 77. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=5.5m$

β	FS MEDIO	PF
5,00	1,74	8,94%
10,00	1,41	18,54%
15,00	1,19	31,66%
20,00	1,04	45,83%
25,00	0,93	58,33%
30,00	0,86	67,61%
35,00	0,81	73,45%
40,00	0,78	76,21%
45,00	0,78	76,22%

Se presenta la (Figura 139) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989) como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

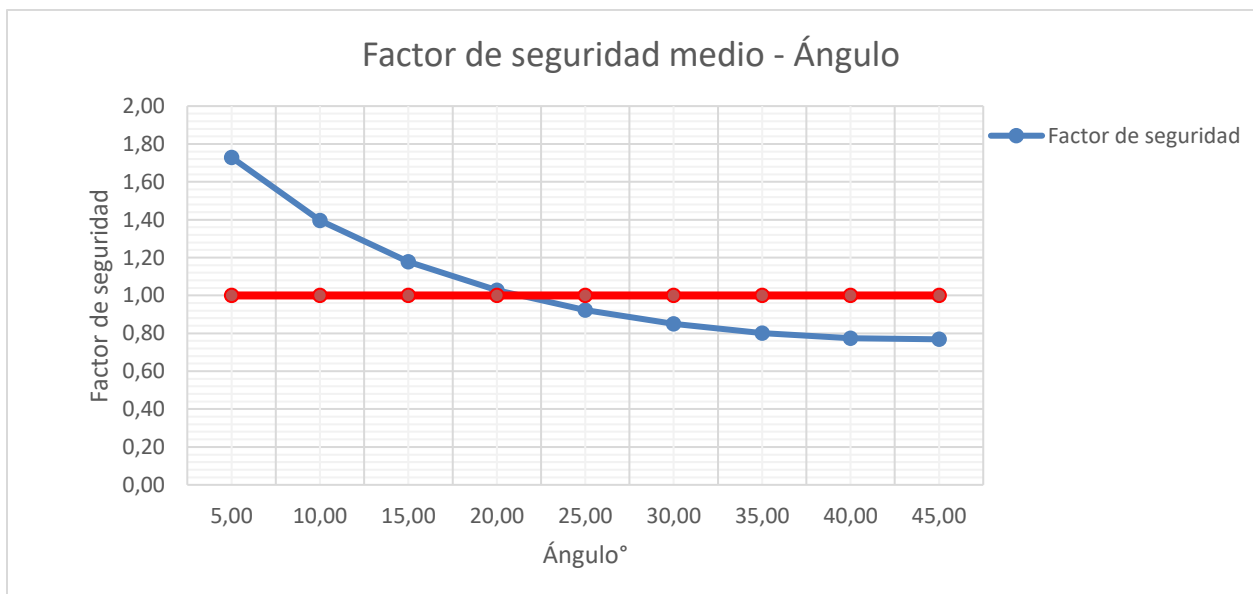


Figura 139. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 140), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando, para el caso se tiene una probabilidad de falla superior al 75%.

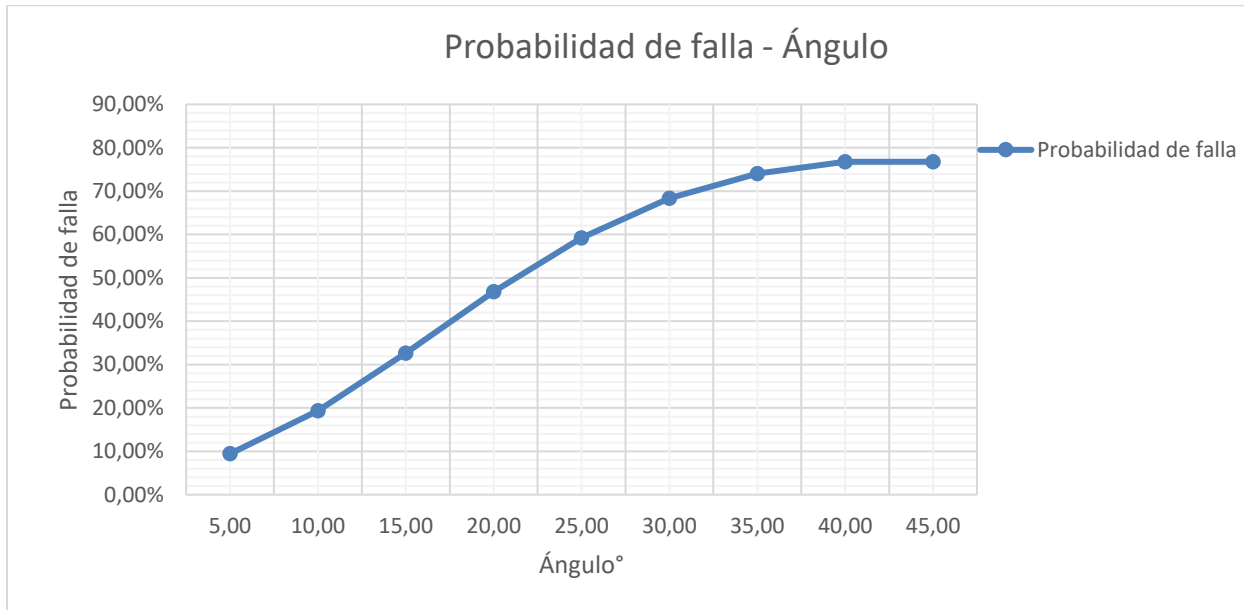


Figura 140. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo con tabla de agua al 100% del espesor del estrato blando, alturas del estrato blando de 6.0 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 78) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 0.70 y máximo de 1.61. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 11.48% y 84.97%.

Tabla 78. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=6.0m

β	FS MEDIO	PF
5,00	1,61	11,48%
10,00	1,30	23,78%
15,00	1,09	39,76%
20,00	0,95	55,79%
25,00	0,85	68,73%
30,00	0,78	77,54%
35,00	0,74	82,67%
40,00	0,71	84,97%
45,00	0,70	84,97%

Se presenta la (Figura 141) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989) como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

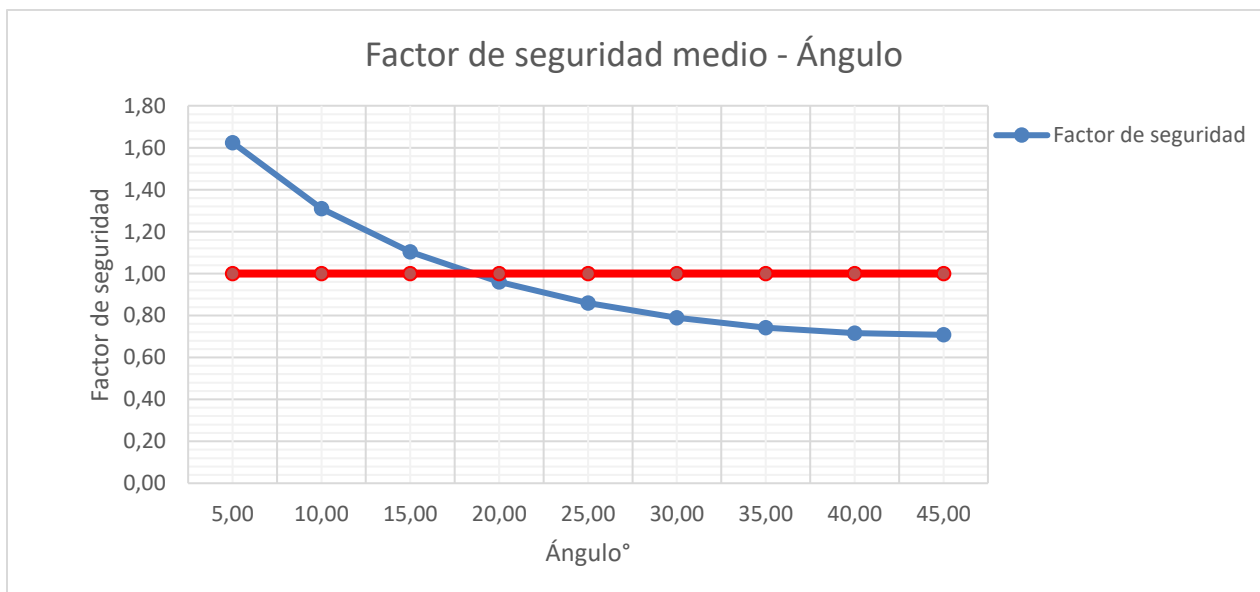


Figura 141. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 142), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando, para el caso se tiene una probabilidad de falla cercana al 85%.

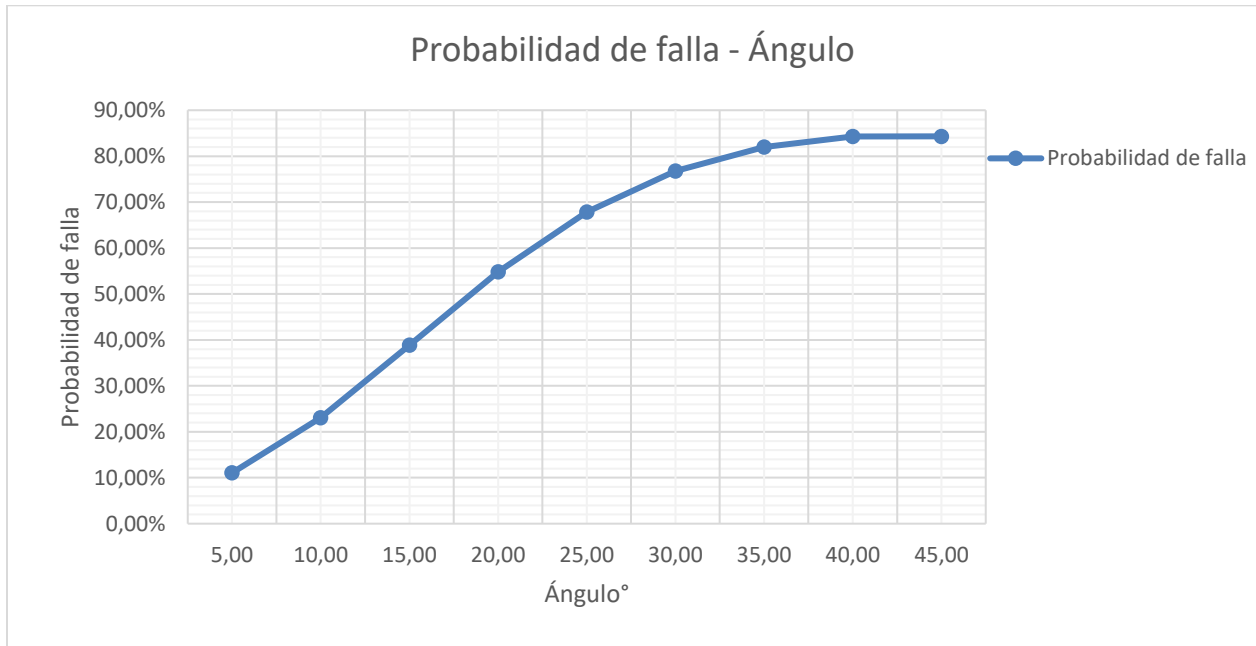


Figura 142. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo con tabla de agua al 100% del espesor del estrato blando, alturas del estrato blando de 6.5 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 79) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 0.66 y máximo de 1.54. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 12.69% y 90.38%.

Tabla 79. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=6.5m$

β	FS MEDIO	PF
5,00	1,54	12,69%
10,00	1,24	26,97%
15,00	1,04	45,17%
20,00	0,90	62,56%
25,00	0,81	75,66%
30,00	0,74	83,91%
35,00	0,69	88,40%
40,00	0,67	90,33%
45,00	0,66	90,38%

Se presenta la (Figura 143) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989) como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

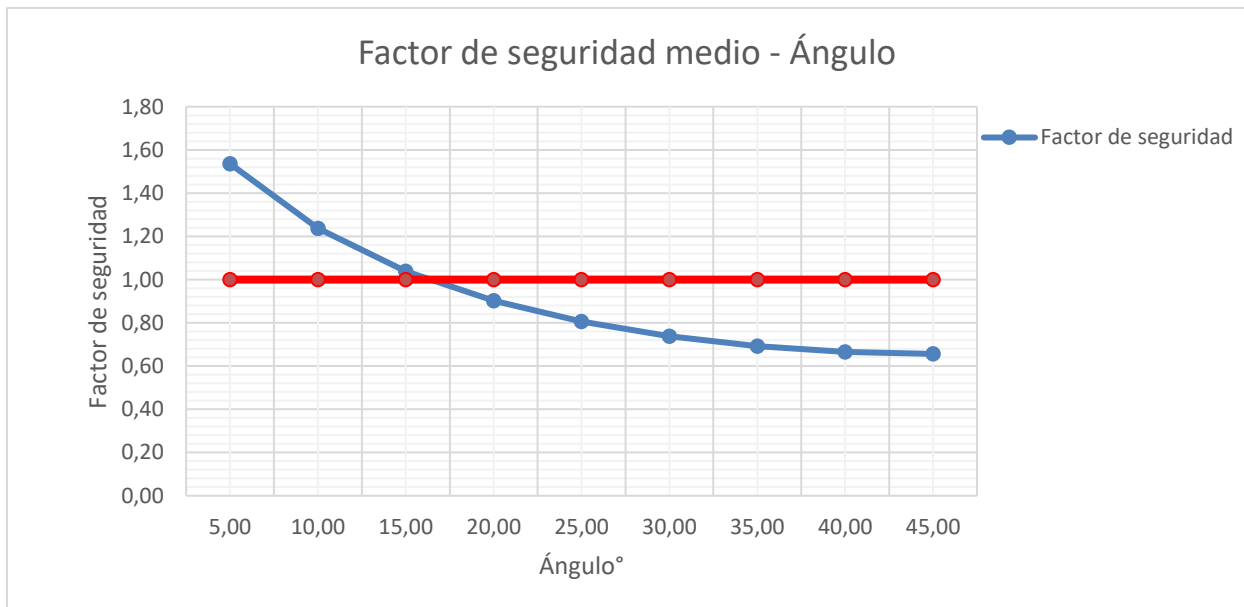


Figura 143. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 144), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando, para el caso se tiene una probabilidad de falla superior al 90%.

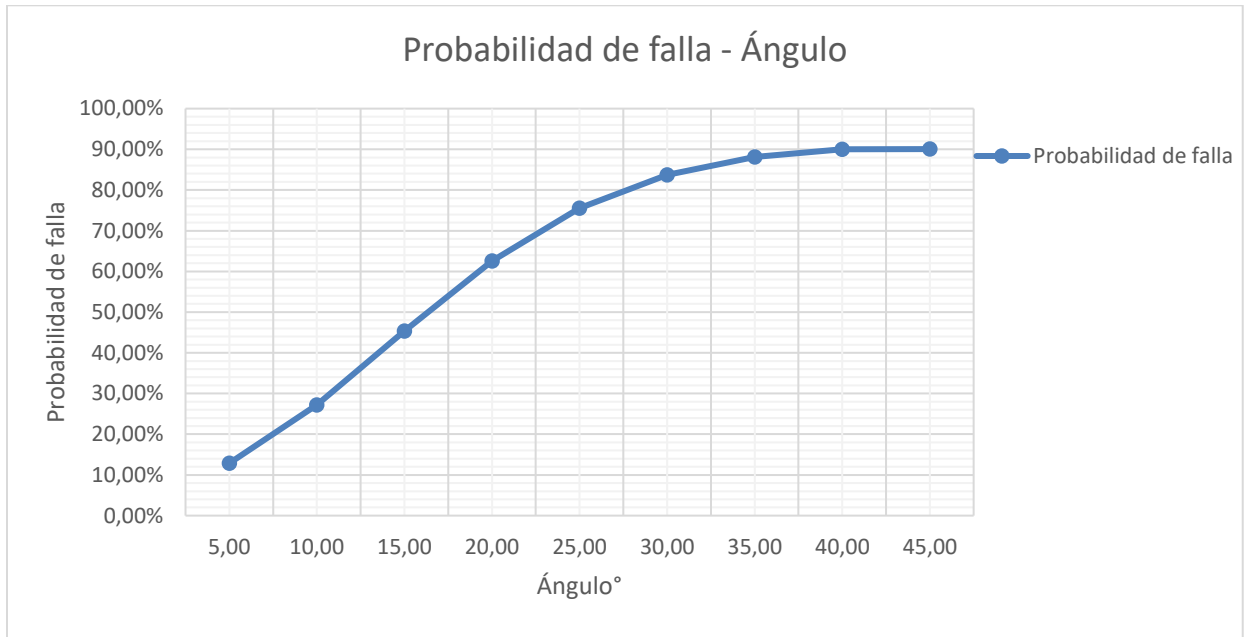


Figura 144. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo con tabla de agua al 100% del espesor del estrato blando, alturas del estrato blando de 7.0 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 80) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 0.61 y máximo de 1.46. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 15.57% y 94.11%.

Tabla 80. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=7.0m$

β	FS MEDIO	PF
5,00	1,46	15,57%
10,00	1,17	32,34%
15,00	0,98	52,39%
20,00	0,85	70,02%
25,00	0,76	82,14%
30,00	0,69	89,12%
35,00	0,65	92,63%
40,00	0,62	94,07%
45,00	0,61	94,11%

Se presenta la (Figura 145) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989) como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

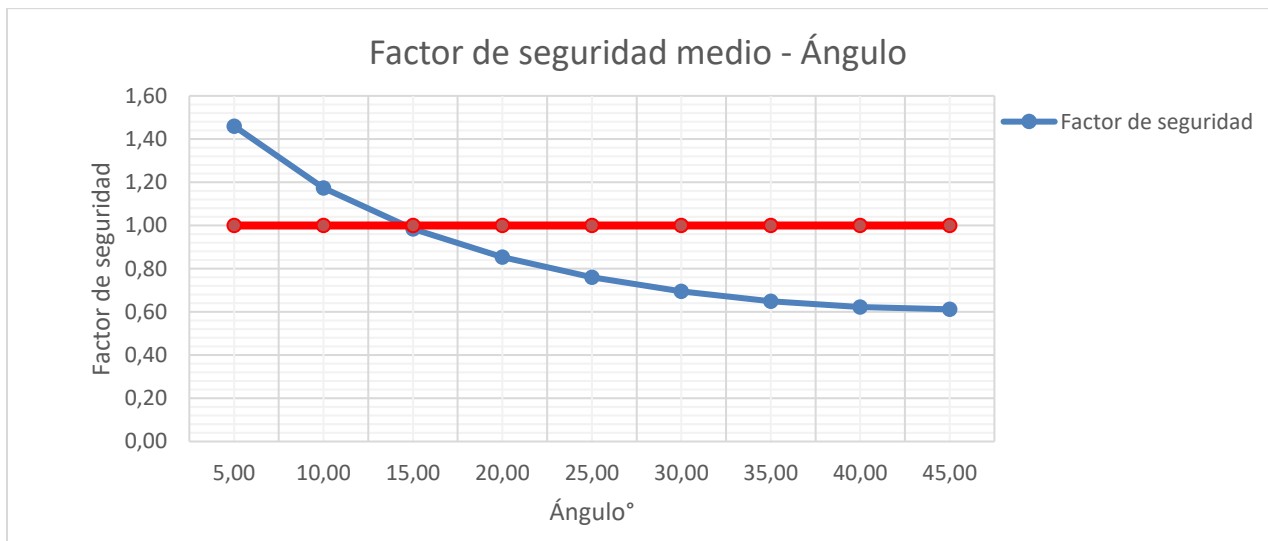


Figura 145. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 146), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando, para el caso se tiene una probabilidad de falla superior al 90%.

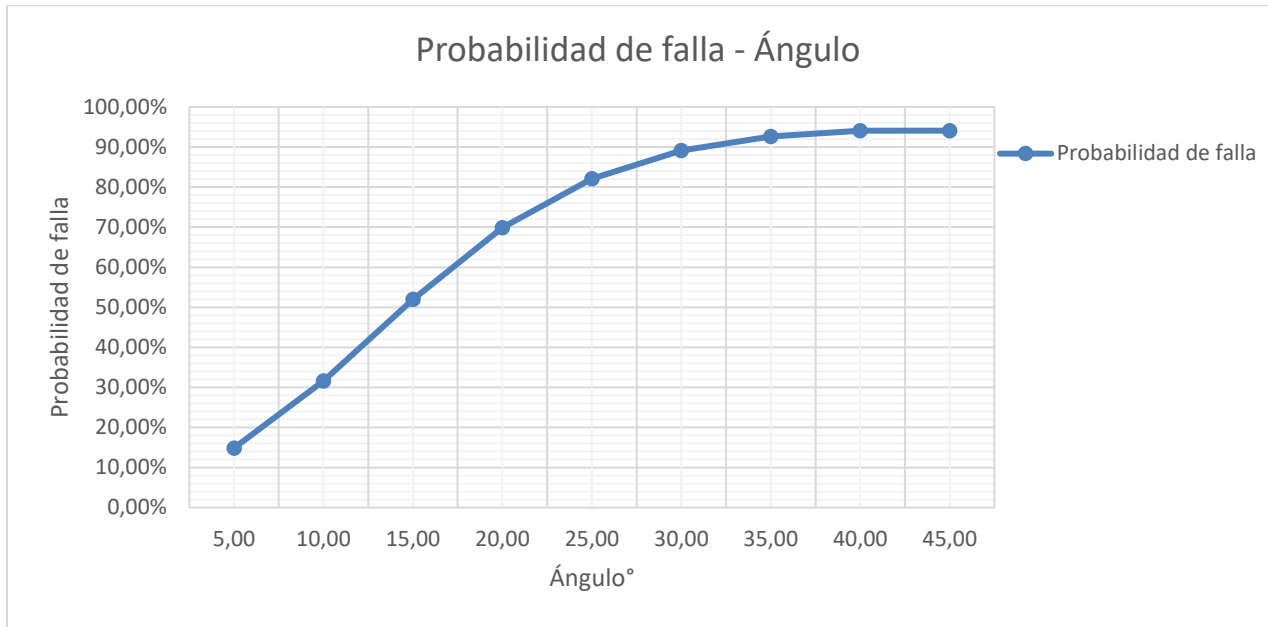


Figura 146. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo con tabla de agua al 100% del espesor del estrato blando, alturas del estrato blando de 7.5 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 81) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 0.57 y máximo de 1.39. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 17.78% y 96.82%.

Tabla 81. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, $z=7.5m$

β	FS MEDIO	PF
5,00	1,39	17,78%
10,00	1,11	37,19%
15,00	0,93	59,17%
20,00	0,81	76,87%
25,00	0,72	87,75%
30,00	0,65	93,32%
35,00	0,61	95,85%
40,00	0,58	96,81%
45,00	0,57	96,82%

Se presenta la (Figura 147) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989) como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

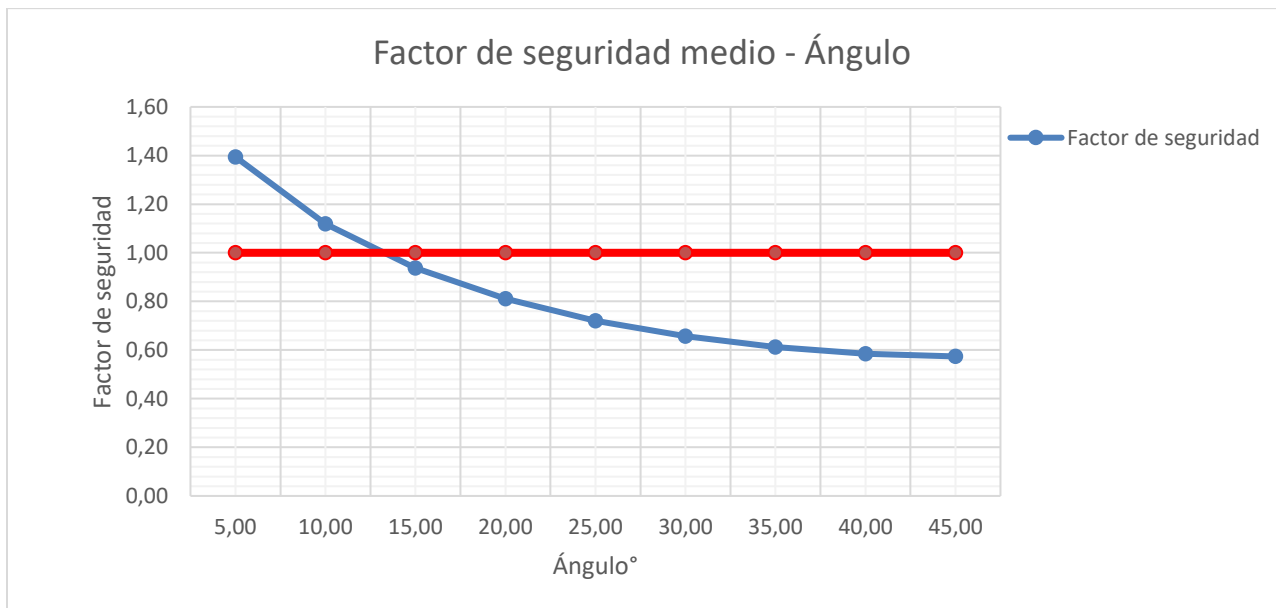


Figura 147. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 148), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando, para el caso se tiene una probabilidad de falla superior al 95%.

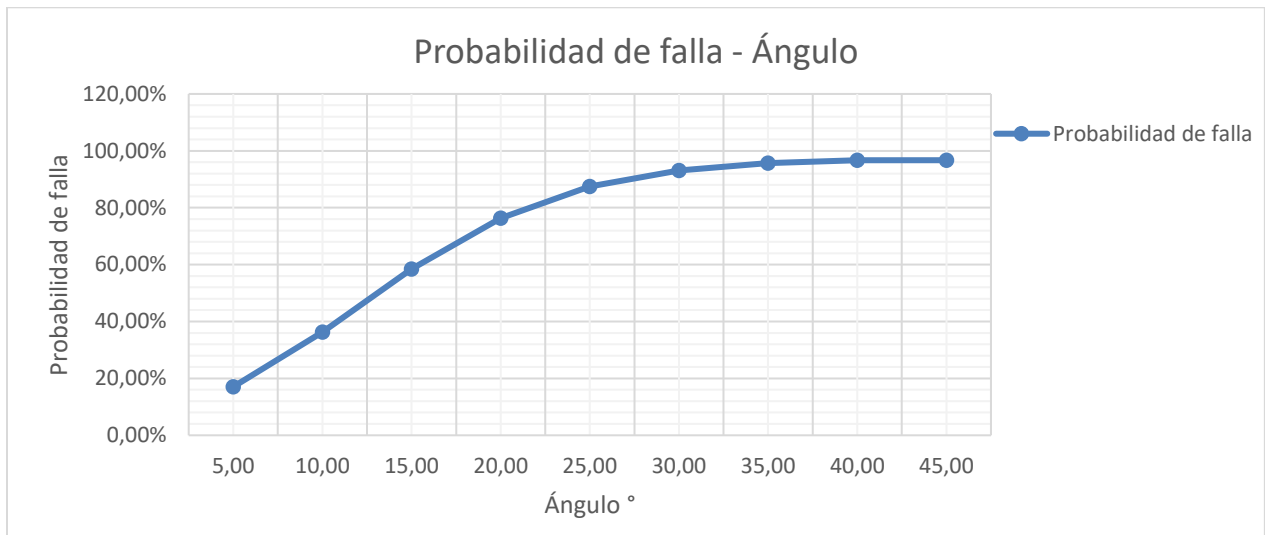


Figura 148. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo con tabla de agua al 100% del espesor del estrato blando, alturas del estrato blando de 8.0 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 82) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 0.54 y máximo de 1.34. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 19.11% y 98.28%.

Tabla 82. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=8.0m

β	FS MEDIO	PF
5,00	1,34	19,11%
10,00	1,08	40,59%
15,00	0,90	64,01%
20,00	0,78	81,52%
25,00	0,69	91,28%
30,00	0,63	95,75%
35,00	0,58	97,60%
40,00	0,55	98,26%
45,00	0,54	98,28%

Se presenta la (Figura 149) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989) como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

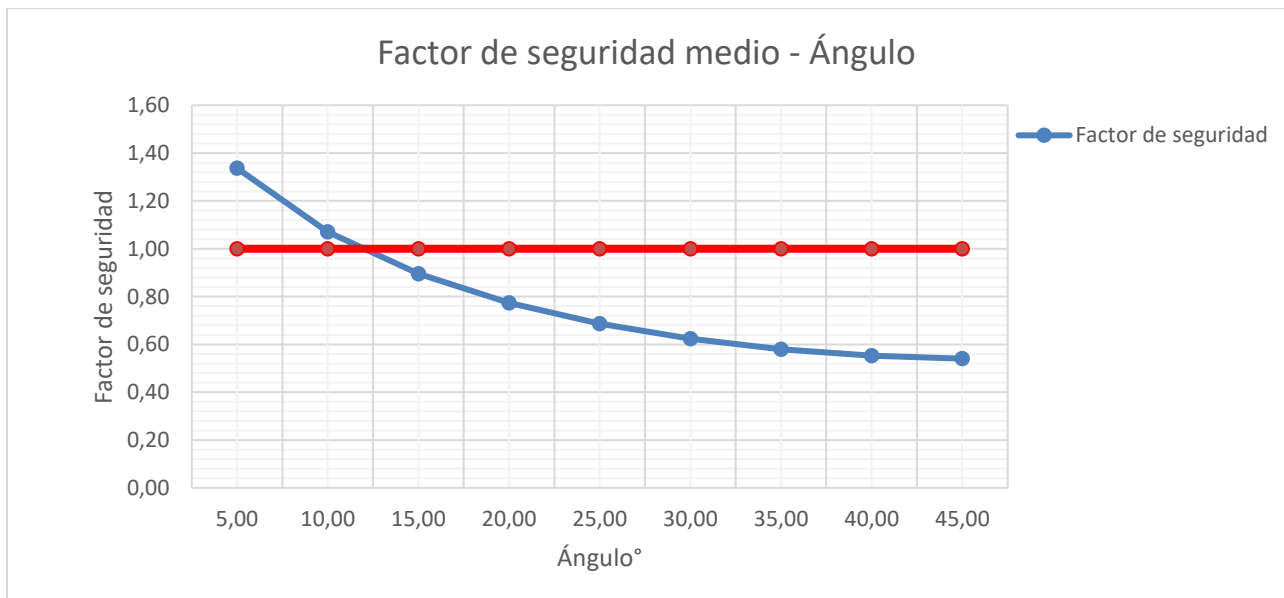


Figura 149. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 150), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando, para el caso se tiene una probabilidad de falla superior al 98%.

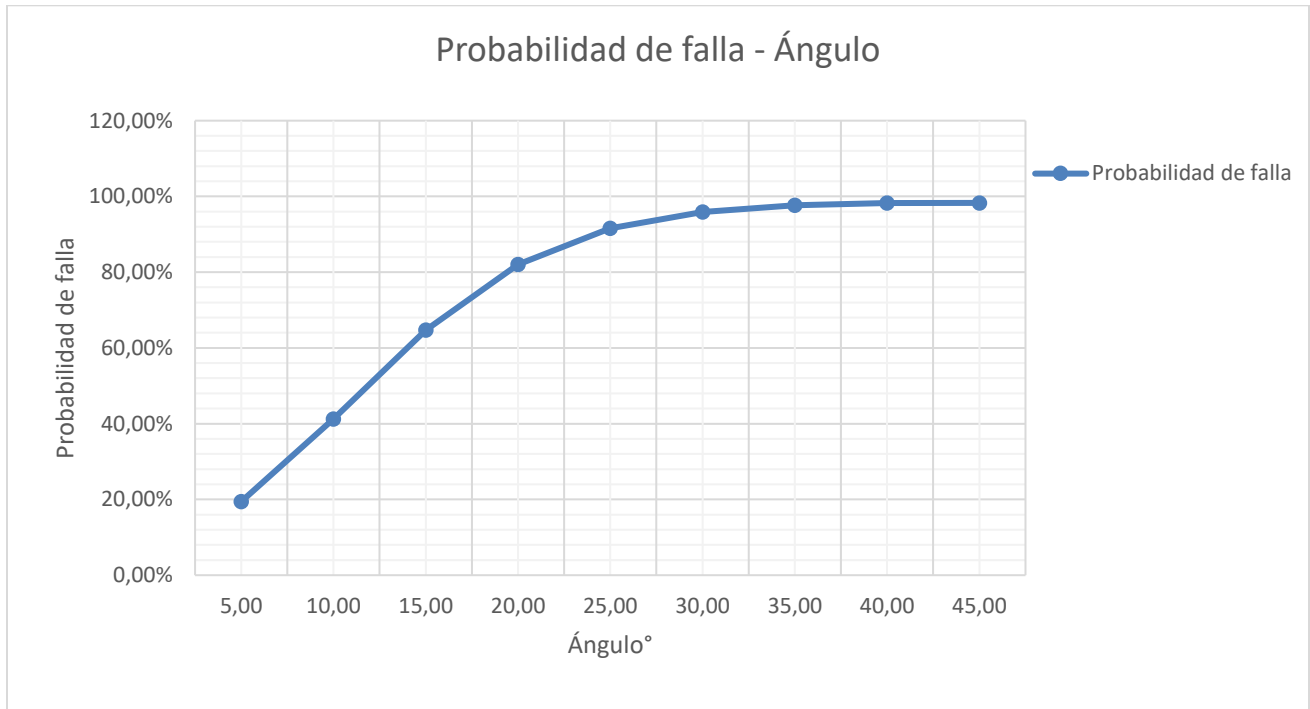


Figura 150. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo con tabla de agua al 100% del espesor del estrato blando, alturas del estrato blando de 8.5 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 83) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 0.51 y máximo de 1.29. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 21.37% y 99.20%.

Tabla 83. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=8.5m

β	FS MEDIO	PF
5,00	1,29	21,37%
10,00	1,03	45,47%
15,00	0,86	70,04%
20,00	0,74	86,50%
25,00	0,66	94,49%
30,00	0,60	97,67%
35,00	0,55	98,81%
40,00	0,53	99,19%
45,00	0,51	99,20%

Se presenta la (Figura 151) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989) como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

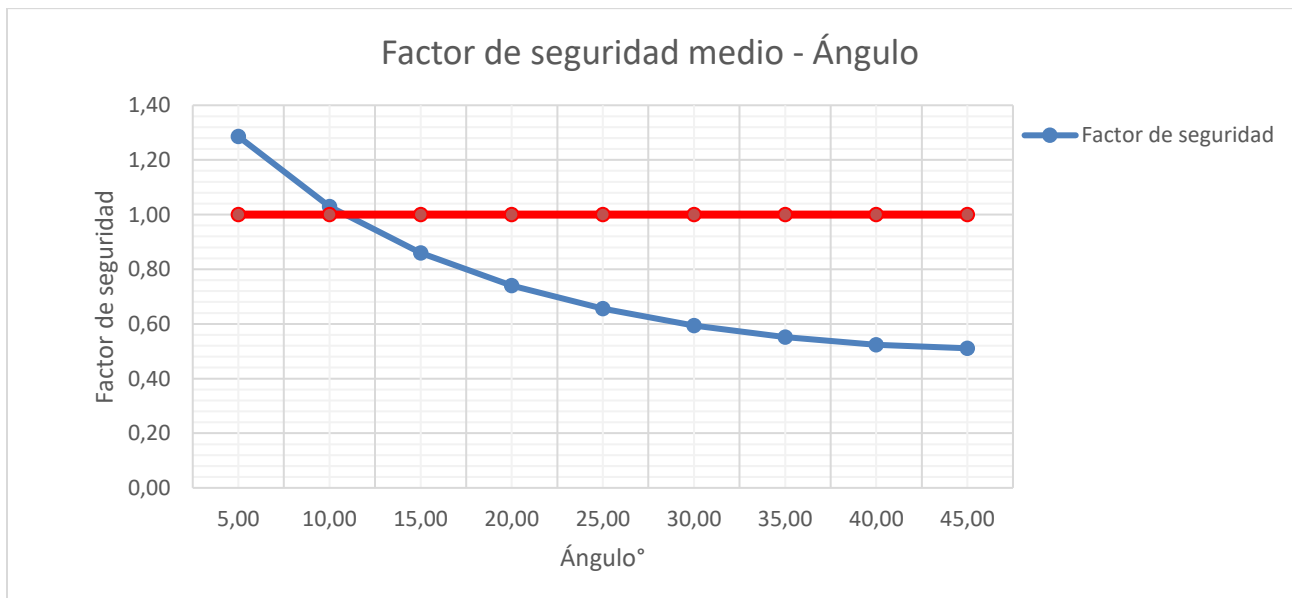


Figura 151. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 152), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando, para el caso se tiene una probabilidad de falla superior al 99%.

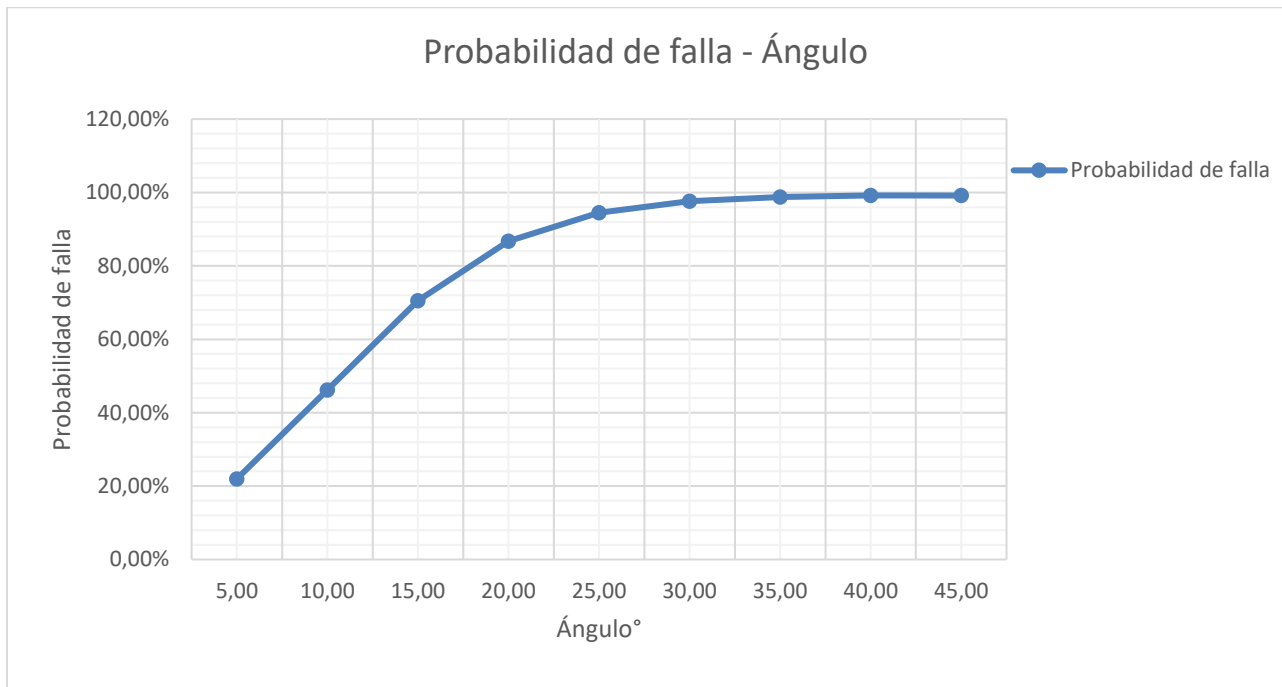


Figura 152. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud.

Los resultados obtenidos del método de Montecarlo con tabla de agua al 100% del espesor del estrato blando, alturas del estrato blando de 9.0 m se presentan a continuación y se obtuvieron a partir de la variación en la inclinación del estrato desde los 5° hasta 45°, el resultado de la modelación se presenta en la (Tabla 84) y tuvo como fin conocer los factores de seguridad medios y probabilidades de falla para 5000 iteraciones, de la realización del método se obtiene F.S mínimo de 0.48 y máximo de 1.24. Por último, Las probabilidades de falla oscilan entre 24.42% y 99.66%.

Tabla 84. Resultados Factor de seguridad medio y probabilidad de falla, z=9.0m

β	FS MEDIO	PF
5,00	1,24	24,42%
10,00	0,99	51,08%
15,00	0,83	75,96%
20,00	0,71	90,63%
25,00	0,63	96,74%
30,00	0,57	98,81%
35,00	0,53	99,46%
40,00	0,50	99,65%
45,00	0,48	99,66%

Se presenta la (Figura 153) factor de seguridad medio vs ángulo de inclinación, en esta se interpreta que a mayor ángulo de inclinación del estrato blando se presenta disminución del factor de seguridad medio, Adicionalmente bajo estos parámetros de entrada se evidencia que se tienen factores de seguridad por debajo de del mínimo aceptable, expresado anteriormente en este documento en el capítulo de estabilidad de taludes y definido por (Suarez, 1989) como aceptable cuando es mayor a 1, en la siguiente gráfica se muestra con línea roja.

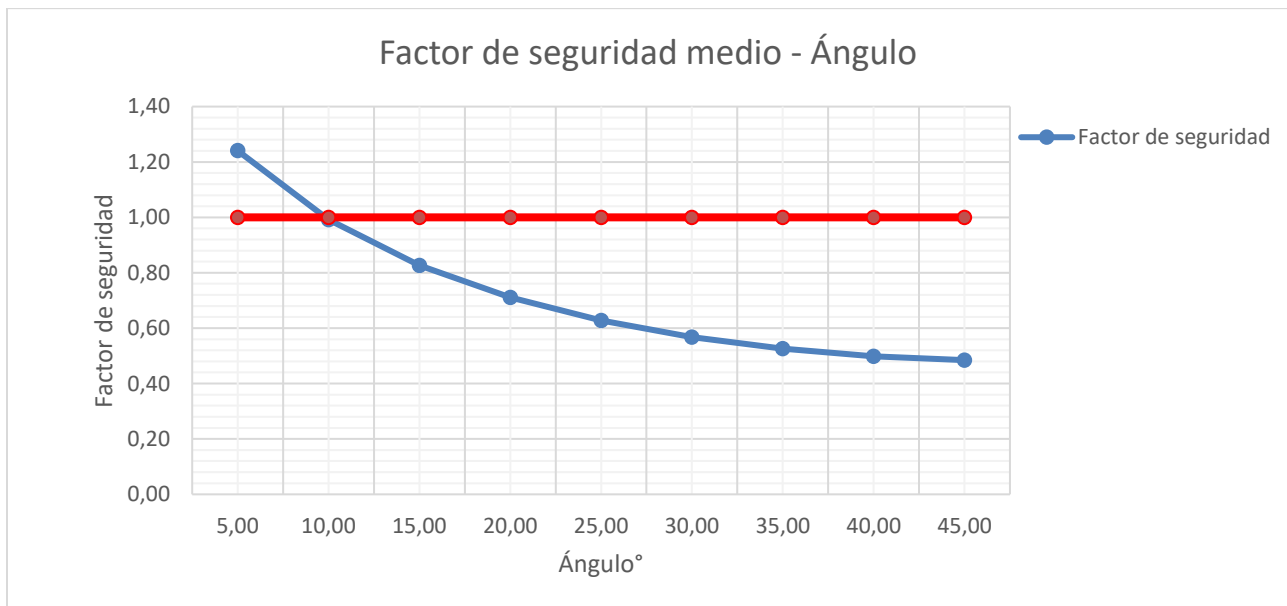


Figura 153. Gráfica FS medio vs ángulo de inclinación del talud.

Los datos de probabilidad de falla vs ángulo de inclinación se presentan en la (Figura 154), en esta gráfica se evidencia la tendencia que tiene de aumentar la probabilidad de falla a medida que se tienen mayores ángulos de inclinación del estrato blando, para el caso se tiene una probabilidad de falla superior al 99.5%.

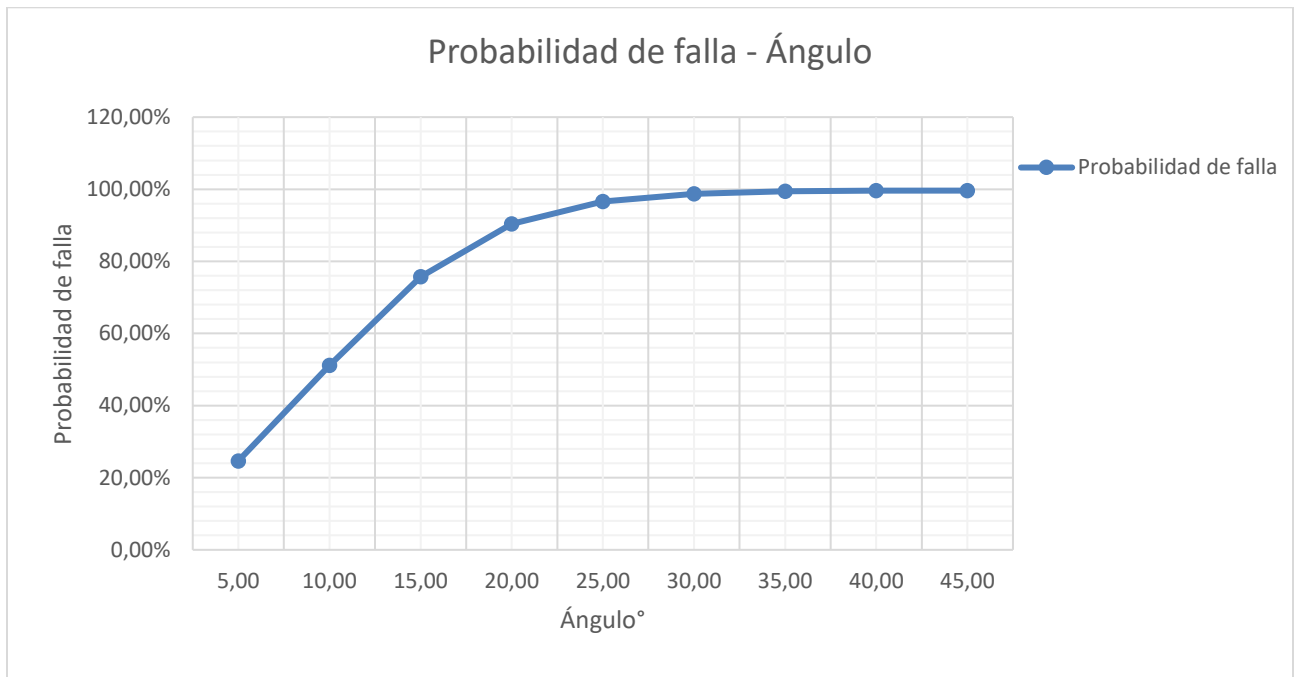


Figura 154. Probabilidad de falla vs ángulo de inclinación del talud

10.8. Anexo modelación 5000 iteraciones altura de agua del 0%.

Se incluye anexo.

10.9. Anexo modelación 5000 iteraciones altura de agua del 0%.

Se incluye anexo.

10.10. Anexo modelación 5000 iteraciones altura de agua del 0%.

Se incluye anexo.