

Maestría en Ingeniería Civil

Monitoreo superficial de movimientos en masa, empleando tecnología LiDAR, relacionando la geología, topografía e información geotécnica del sitio.

Julián André Galvis Flores

Bogotá, D.C. Julio de 2016



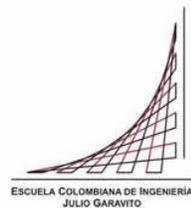
**Monitoreo superficial de movimientos en masa, empleando
tecnología LiDAR, relacionando la geología, topografía e
información geotécnica del sitio.**

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

Director
Diego Cobos Roa
Ing.

Jurado:
Ing. Manuel García
Ing. Xavier Laloum

Bogotá, D.C. Julio de 2016



La tesis de maestría titulada “Monitoreo superficial de movimientos en masa, empleando tecnología LiDAR, relacionando la geología, topografía e información geotécnica del sitio”, Presentada por Julián André Galvis Flores, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

Director de la tesis
Diego Cobos Roa

Jurado:

Ing. Manuel García

Ing. Xavier Laloum

Bogotá, D.C, Septiembre 16 de 2016.

Dedicatoria

Este trabajo de grado está dedicado a mis padres, Nancy y Orlando (QEPD), quienes me han formado en la persona que soy.

A mi esposa Laura por su apoyo constante e incondicional en el cumplimiento de esta meta.

Y especialmente a mi hijo; Alejandro, quien es el motor de mi vida.

Agradecimientos

En primera instancia quiero agradecerle a Dios por brindarme salud, fortaleza, alegría, tranquilidad, sabiduría, entendimiento y humildad, para alcanzar los sueños, logros y metas propuestas en éste proyecto.

Agradezco a Diego Cobos Roa, PhD, por su apoyo, aportes académicos, logísticos y morales, para la ejecución de este documento.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería, por ser parte de mi proceso formativo, y e institución guía en mi formación profesional.

Al Edwin García, PhD, por su colaboración en la selección del sitio, y brindar información pertinente y eficaz del sitio estudiado.

Resumen

El monitoreo de movimientos en masa, se considera una actividad de gran importancia en la ejecución de proyectos ingenieriles, particularmente donde se ha modificado la topografía inicial de la zona, y se busca controlar la estabilidad de la nueva topografía.

Existen también zonas de inestabilidad local, generadas por agentes naturales o climáticos, y zonas históricamente inestables debido a las propiedades intrínsecas de los materiales que conforman los taludes, las fallas geológicas, acción antrópica, etc.

Para identificar las señales de los movimientos en masa, usualmente se requiere de un observador con entrenamiento en el tema, dichas señales se hacen evidentes cuando el movimiento en masa ha avanzado considerablemente.

Si estos movimientos en masa, se detectan en etapas tempranas, se pueden tomar precauciones para controlar movimientos mayores, grandes fallas y mitigar los costos en las tareas de remediación, así como aminorar las actividades de evaluación y diseños para controlar dichas situaciones.

En este proyecto de grado, se ha implementado la tecnología de detección de imágenes por escaneo de láser, o sus siglas en inglés LiDAR (Light Detection and Ranging), para realizar el monitoreo de una zona específica ubicada a las afueras de la ciudad de Medellín, Antioquia, entre los meses de Diciembre de 2015 y Junio de 2016.

El sitio de estudio presenta un continuo y antiguo movimiento en masa tipo reptacional, el cual se acelera con las lluvias que usualmente se presentan, ha sido objeto de monitoreos usuales e instrumentación por parte de entidades gubernamentales, el sitio de estudio es de importancia para la comunidad de los municipios de Medellín y Bello, ya que el movimiento en masa se encuentra alterando la estabilidad de la banca que compone la vía que comunica Medellín con San Pedro.

La implementación del equipo LiDAR, es con el objeto de Monitorear dicho sitio de estudio de manera rápida, determinando las condiciones actuales del talud tales como; forma y velocidad de desplazamiento, determinar las partes del movimiento en falla, el tipo de movimiento y relacionar su velocidad con factores geotécnicos, geológicos y topográficos que se encuentren en sitio.

Finalmente obtener un resultado del monitoreo empleando tecnología LiDAR, evaluando y concluyendo acerca del resultado final, sugiriendo posibles aplicaciones en el área de la geotecnia.

Contenido

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
CAPÍTULO I.	21
RIESGOS GEOLÓGICOS “GEOHAZARDS”	21
1.1 Deslizamientos	22
1.1.1 Geología Colombiana.....	23
1.1.2 Formaciones rocosas en zona Occidental.....	24
1.2 Geología del sitio de Estudio	24
1.2.1 El Valle de Aburrá.....	25
1.2.2 Geología regional.	26
1.2.2.1 Zona Homogénea 1: Noroccidental.....	28
1.2.3 Sismicidad local	30
1.2.3.1 Deslizamientos Inducidos Por sismos.....	32
1.3 Viviendas demolidas por fallas estructurales atribuidas a la inestabilidad del sitio.	33
CAPÍTULO II.	35
INESTABILIDAD DE TALUDES	35
2.1 Factores de inestabilidad	38
2.1.1 Formación geológica:	38
2.1.2 Estructura intrínseca de cada material.....	40
2.1.3 Estructura Geología.....	41
2.1.3.1 Planos de Estratificación	41
2.1.3.2 Discontinuidades paralelas a la esquistosidad	42
2.1.4 La Geomorfología	43
2.1.5 Meteorización de los materiales.....	44
2.1.6 Condiciones topográficas	45
2.1.7 El efecto del Agua.....	46
2.1.7.1 Lluvias Torrenciales	46
2.1.7.2 Lluvias acumuladas	47

2.1.7.3	Ciclo Hidrológico en el Talud	47
2.1.7.4	Precipitaciones en zona de estudio	48
2.1.8	La sismicidad	54
2.1.9	El efecto Antrópico.....	54
2.1.9.1	Cambios en la topografía y cargas del talud	55
2.1.9.2	Cambios en las condiciones de humedad.....	55
2.1.9.3	Vibraciones	56
2.1.9.4	Cambios en la cobertura vegetal.....	56
2.1.9.5	Otros factores antrópicos.....	57
2.1.10	El factor tiempo.....	57
2.2	Mecanismos disparadores de deslizamientos.....	58
2.2.1	Respuesta umbral.....	59
2.3	Identificación de señales de inestabilidad	60
2.3.1	Grietas de Tracción	61
2.3.2	Escarpes	62
2.3.3	Hundimiento de barandas y sub rasantes	63
2.3.4	Detritos en la vía.....	64
2.3.5	Abultamientos y Deformaciones Superficiales.....	65
2.3.6	Alcantarillas Bloqueadas	66
2.3.7	Cunetas Averiadas	67
2.3.8	Mal Entrega de Aguas	69
2.3.9	Nacimientos de agua.....	70
2.3.10	Áreas con Presencia de agua	71
2.3.11	Erosión.....	71
2.3.12	Estructuras existentes	72
2.4	Clasificación de los Movimientos en Masa	73
2.4.1	Definiciones y partes de un talud y de un deslizamiento.....	73
2.4.2	Clasificación de movimientos en masa.....	77
2.4.2.1	Caídas	78
2.4.2.1.1	Talus, coluviones y otros depósitos.....	80
2.4.2.2	Volcamientos.....	81
2.4.2.2.1	Modos de Volcamiento.....	82
2.4.2.3	Deslizamientos.....	84

2.4.2.3.1 Deslizamiento Rotacional.....	85
2.4.2.3.2 Deslizamiento Traslacional	86
2.4.2.4 Propagación Lateral.....	88
2.4.2.5 Hundimientos	89
2.4.2.5.1 Hundimiento por Deformación Geológica (“Sagging”)	89
2.4.2.5.2 Depresión por Subsistencia “Formación de cavernas y sinkholes”	90
2.4.2.5.3 Hundimientos y desplazamientos confinados por cambio de presiones de poros.....	90
2.4.2.5.4 Hundimiento de terraplenes.....	91
2.4.2.6 Flujos.....	92
2.4.2.6.1 Flujos de Detritos y Flujos de Tierra	93
2.4.2.6.2 Flujos de lodos	95
2.4.2.6.3 Avalanchas.....	96
2.4.2.7 Movimientos de Reptación	98
2.4.2.8 Movimientos Complejos.....	99
CAPÍTULO III.	100
DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO	100
3.1 Información general Vereda Pajarito y sitio de estudio	100
3.2 Hidro-geografía del sitio de estudio	103
3.3 Geomorfología sitio de estudio.	105
3.4 Información de depósito de suelos en sitio de estudio.....	105
3.5 Procesos Morfo dinámicos.....	106
3.5.1 Proceso de inestabilidad en sitio de estudio tomando información externa.....	106
3.6 Información de sitio de estudio empleando sistemas de información.....	107
3.7 Señales de Inestabilidad	112
3.7.1 Hundimiento de sub rasante	114
3.7.2 Estructuras Existentes.....	114
3.7.3 Escarpes	116
3.7.4 Deformaciones superficiales	119
3.7.5 Nacimientos de agua.....	121
CAPITULO IV	124
CARACTERIZACIÓN DEL DESLIZAMIENTO	124

4.1 Dimensiones del Movimiento	124
4.2 Volumen del deslizamiento	128
4.3 Angulo del desplazamiento	130
4.4 Angulo y longitud del recorrido.....	130
4.5 Método para describir la actividad de un deslizamiento.....	130
4.5.1 Estado de Actividad.....	131
4.5.2 Distribución de Actividad	132
4.5.3 Modo de Actividad	132
4.6 Velocidad de los movimientos en masa	133
4.7 Clasificación según tamaño	135
CAPÍTULO V	137
MONITOREO DEL DESLIZAMIENTO.....	137
5.1 Funcionamiento del LiDAR.	137
5.2 Realización de modelo a escala.	138
5.3 Aplicaciones Geotécnicas.	146
5.3.1 Caso Histórico 1; “El deslizamiento de ladera en noviembre 2007 y generación de una presa natural en el río Grijalva, Chiapas, México”	146
5.3.2 Caso Histórico 2; “Monitorización de un Talud en Yesos Mediante Laser Escáner Terrestre (LiDAR): El Caso de la Peña de Finestrat, Alicante.	147
5.3.3 Caso Historico 3; “Deslizamiento en la Ruta Nacional N°1 kilómetro 44 + 400 en Costa Rica”	148
5.4 Información del monitoreo realizado.....	150
5.5 Objetivos del monitoreo:.....	151
5.5.1 Objetivos de la Instrumentación:.....	152
5.6 Equipo para el monitoreo	153
5.7 Metodología del monitoreo en campo.....	154
5.8 Imágenes del primer monitoreo realizado en el sitio de estudio.	166
CAPÍTULO VI	170
PROCESAMIENTO Y RESULTADOS.....	170
6.1 Topografía del talud	170
6.1.1 Plano topográfico ESCANEEO 1:.....	171
6.1.2 Plano topográfico ESCANEEO 2:.....	171
6.1.3 Plano topográfico ESCANEEO 3:.....	172

6.1.4 Comparación de perfiles topográficos.....	172
6.2 Modelación del talud:	173
6.2.1 Tipo de movimiento:	174
6.2.2 Deposito.....	174
6.2.3 Dimensiones del deslizamiento.....	174
6.2.4 Topografía del sitio	175
6.2.5 Empleo de software de modelación	175
6.3 Procesamiento ESCANEEO 1:.....	180
6.4 Procesamiento ESCANEEO 2:.....	182
6.4.1 Comparación de ESCANEOS 1 y ESCANEEO 2:	184
6.4.1.1 Comparación de perfiles ESCANEEO 1 – ESCANEEO 2 empleando Cloud Compare.....	189
6.5 Procesamiento ESCANEEO 3:.....	190
6.5.1 Comparación de ESCANEOS 1 y ESCANEEO 3:	193
6.5.1.1 Comparación de perfiles ESCANEEO 1 – ESCANEEO 3 empleando Cloud Compare.....	197
6.6 Resultados Finales.....	199
7. CONCLUSIONES.....	201
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	205

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Valle de Aburra, crecimiento de la construcción.	25
Figura 2. Mapa del Valle de Aburra en 3D. Fuente: Hermelin M. (2007) Valle de Aburra	26
Figura 3. Áreas estudio de Micro Zonificación Sísmica Municipio de Medellín	28
Figura 4. Ubicación de viviendas afectas por inestabilidad local.	34
Figura 5. Historio de lluvias mes de diciembre año 2015.....	49
Figura 6. Histórico de lluvias mes de Enero año 2016.....	50
Figura 7. Histórico de lluvias mes de Febrero año 2016.....	51
Figura 8. Histórico de lluvias mes de Marzo año 2016.....	51
Figura 9. Histórico de lluvias mes de Abril año 2016.....	52
Figura 10. Histórico de lluvias mes de Mayo año 2016.....	53
Figura 11. Histórico de lluvias mes de Junio año 2016.....	53
Figura 12. Respuesta Umbral de un talud	60
Figura 13. Grietas de tracción en pavimento, indicando el movimiento del talud que conforma la banca.....	62
Figura 14. Escarpe, evidente señal de desplazamiento de material.....	63
Figura 15. Hundimiento de zona, se evidencia tanto en la baranda como el terraplén.....	64
Figura 16. Detritos transportados desde la parte alta del talud, desintegración de la roca.....	65
Figura 17. Abultamiento en la calzada, causado por el desplazamiento de la masa en el talud que se presenta, se observa como la línea de falla es continua.....	66
Figura 18. Alcantarilla bloqueada, estancamiento de aguas que genera problemas en los terraplenes y pérdida del hombro de la vía.....	67
Figura 19. Cuneta averiada, grietas y fractura de cunetas causadas por el movimiento del suelo, zona de infiltración de agua hacia la estructura de la calzada.....	68
Figura 20. Mal entrega de aguas, dissipador construido para evacuar las aguas de la vía, causando erosión hacia la parte baja del talud, futura inestabilidad del talud.....	69
Figura 21. Nacimientos de agua.....	70

Figura 22. Estructuras afectadas por deslizamiento.:	72
Figura 23. Partes de un talud.	74
Figura 24. Partes de un Deslizamiento.	76
Figura 25. Caída de Residuos y Caída de roca.	78
Figura 26. Formación de caída de material.	79
Figura 27. Factores que propician la caída de rocas.	80
Figura 28. Volcamiento de material en talud.	81
Figura 29. Volcamiento a Flexión.	82
Figura 30. Volcamiento en V invertida.	83
Figura 31. Volcamiento Flexión en Bloque	83
Figura 32. Deslizamiento en suelo blando.	84
Figura 33. Deslizamiento rotacional.	85
Figura 34. Movimientos de Traslación controlados por superficies débiles.	87
Figura 35. Movimientos de Traslación controlados por el estado de la roca.	87
Figura 36. Esquema de propagación lateral de bloques de arenisca.	88
Figura 37. Esquema de Hundimientos por deformación geológica.	89
Figura 38. Hundimientos por desplazamientos por cambio de presiones de poros.	91
Figura 39. Esquemas de hundimiento de terraplenes.	91
Figura 40. Flujo de acuerdo a su velocidad.	94
Figura 41. Flujo de detritos.	94
Figura 42. Flujo de lodos, formación y avance.	96
Figura 43. Poder de una avalancha, material depositado.	97
Figura 44. Ubicación del sitio de estudio, ciudad de Medellín.	101
Figura 45. Sitio de estudio en vereda Pajarito.	102
Figura 46. Ubicación de quebradas en la zona de estudio.	104
Figura 47. Mapa ubicación de sitio de estudio e información de perfil existente. s.	107
Figura 48. Inventario de deslizamientos cercanos al sitio del estudio.	108
Figura 49. Zonificación de amenazada geotécnica, SIMMA.	110
Figura 50. Zonificación de susceptibilidad de amenazada geotécnica, SIMMA.	110
Figura 51. Unidad geomorfológica existente.	111
Figura 52. Sitio de estudio antes de intervención, anterior a Diciembre de 2015..	112
Figura 53. Visita a sitio de estudio, Febrero de 2016.	113
Figura 54. Hundimiento de sub rasante sitio de estudio..	114

Figura 55. Estructuras existentes en sitio de estudio..	115
Figura 56. Inclínación de vegetación como seña de deslizamiento..	116
Figura 57. Escarpes superiores observados en el sitio de estudio.....	117
Figura 58. Escarpe inferior observado en el sitio de estudio.	118
Figura 59. Escarpes costados Este y Oeste observados en el sitio del estudio. F	119
Figura 60. Panorámica del deslizamiento desde la parte alta hacia el sur (parte baja). .	120
Figura 61. Panorámica del deslizamiento desde un punto medio hacia el norte (parte alta). .	121
Figura 62. Panorámica del deslizamiento desde un punto medio hacia el sur (parte baja)..	121
Figura 63. Presencia de agua en disipador..	122
Figura 64. Zona blanda en el sitio de estudio.....	123
Figura 65 Dimensiones de un deslizamiento.....	125
Figura 66. Medidas del deslizamiento.	126
Figura 67. Medidas sobre puestas en perfil resultante del escaneo.....	127
Figura 68. Realización de modelo a escala, equipo, esferas y modelo.....	139
Figura 69. Esferas de referencia y modelo.....	139
Figura 70. Imagen digital del modelo a escala..	140
Figura 71. Correspondencia de esferas como puntos de referencia..	141
Figura 72. Determinación de magnitudes de desplazamientos.	142
Figura 73. Magnitudes de desplazamientos.	142
Figura 74. ESCANEO 1 base, con línea donde se generará el perfil.	143
Figura 75. Trazado en planta de la ubicación de la línea de perfil, antes de la ocurrencia de desplazamientos..	144
Figura 76. Perfil del ESCANEO 1, antes de generar desplazamientos en su superficie.	144
Figura 77. Comparación de perfiles empleando Cloud Compare, ejemplo a escala..	145
Figura 78. Foto Interpretación LiDAR aéreo.;.....	147
Figura 79. Monitorización de talud rocoso en la Peña de Finestrat, Alicante.	148
Figura 80. Captura de talud con desprendimiento de material.	149
Figura 81. Escaneo de la vía que comunica al municipio de San Pedro, equipo LiDAR estacionario sobre trípode de apoyo, y ubicado sobre muro de gavión existente al costado norte de la vía.....	151

Figura 82. Levantamiento del flanco occidental con equipo LiDAR.....	152
Figura 83. Zona de estudio, sentido del movimiento, obras existentes y vía actual.....	156
Figura 84. Esferas de referencia ubicadas sobre el sitio de estudio.....	157
Figura 85. Equipo LiDAR terrestre, y las tres esferas de referencia.....	158
Figura 86. Señales de referencia fabricadas e instaladas.....	160
Figura 87. Zona del sitio de estudio.....	161
Figura 88. Inicio de actividades de monitoreo del sitio de estudio.....	162
Figura 89. Metodología del monitoreo, recorrido de todo el deslizamiento.....	163
Figura 90. Ubicación de equipo en campo “armadas”.....	165
Figura 91. Detalle de ubicación de equipo en campo “armadas”.....	166
Figura 92. Empalme de los diferentes escaneos, modelo digital vista desde norte a sur.....	167
Figura 93. Modelo digital de superficie antes de proceso “limpiar”.....	169
Figura 94. Plano topográfico ESCANEEO 1. PLANO TOPOGRAFICO BASE.....	171
Figura 95. Plano topográfico ESCANEEO 2.....	171
Figura 96. Plano topográfico ESCANEEO 3.....	172
Figura 97. Comparación de perfiles topográficos entre escaneos 1, 2 y 3, empleando ACAD.....	173
Figura 98. Registro de Perforación.....	176
Figura 99. Modelo de superficie topográfica en Slide, dimensiones geométricas.....	177
Figura 100. Modelo de superficie topográfica en Slide, condición estática, determinación del FS.....	178
Figura 101. Modelo de superficie topográfica en Slide, condición más crítica, determinación del FS.....	178
Figura 102. Medidas de superficie potencial de falla.....	179
Figura 103. Modelo digital ESCANEEO 1 y curvas de nivel.....	181
Figura 104. Modelo digital ESCANEEO 2 antes de proceso “limpiar”.....	182
Figura 105. Modelo digital ESCANEEO 2 antes de proceso “limpiar”.....	183
Figura 106. Modelo digital ESCANEEO 2 tras proceso “limpiar”.....	183
Figura 107. Comparación de nubes ESCANEEO 1 y ESCANEEO 2, escala a 1 metro.....	184
Figura 108. Opciones de escala del software, comparación de nubes ESCANEEO 1 y ESCANEEO 2, escala a 0,59 metros.....	185

Figura 109. Comparación de nubes ESCANEEO 1 y ESCANEEO 2, escala a 0,59 metros.....	186
Figura 110. Lectura de desplazamientos entre ESCANEEO 1 y ESCANEEO 2, escala a 0,59 metros, zona superior.....	187
Figura 111. Lectura de desplazamientos entre ESCANEEO 1 y ESCANEEO 2, escala a 0,59 metros, zona central.....	187
Figura 112. Lectura de desplazamientos entre ESCANEEO 1 y ESCANEEO 2, escala a 0,59 metros, zona inferior.....	188
Figura 113. Ubicación del perfil base sobre modelo digital ESCANEEO 1.....	189
Figura 114. Comparación de perfiles, desplazamientos entre los meses de Enero y Abril del año 2016.....	190
Figura 115. Ubicación del equipo terrestre.....	191
Figura 116. Modelo digital ESCANEEO 3 antes de proceso “limpiar”.....	191
Figura 117. Modelo digital ESCANEEO 3 antes de proceso “limpiar”.....	192
Figura 118. Modelo digital ESCANEEO 2 tras proceso “limpiar”.....	192
Figura 119. Comparación de nubes ESCANEEO 1 y ESCANEEO 3, escala a 1 metro.....	193
Figura 120. Desplazamientos registrados sobre superficie del deslizamiento..	194
Figura 121. Lectura de desplazamientos entre ESCANEEO 1 y ESCANEEO 3, escala a 0,99 metros, zona superior.....	195
Figura 122. Lectura de desplazamientos entre ESCANEEO 1 y ESCANEEO 3, escala a 0,99 metros, zona central.....	195
Figura 123. Lectura de desplazamientos entre ESCANEEO 1 y ESCANEEO 3, escala a 0,99 metros, zona inferior.....	196
Figura 124. Lectura de desplazamientos entre ESCANEEO 1 y ESCANEEO 3, escala a 0,99 metros, zona inferior.....	197
Figura 125. Ubicación del perfil base sobre modelo digital ESCANEEO 1.....	198
Figura 126. Comparación de perfiles, desplazamientos entre los meses de Enero y Julio del año 2016..	198
Figura 127. Resultados Generales.....	200

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Listado de los 20 países más afectados por desastres geológicos, relacionados en el periodo entre 1900 a 2009.	21
Tabla 2. Nomenclatura de depósitos de perfiles típicos del Valle de Aburra.....	27
Tabla 3. Perfiles típicos que caracterizan la zona homogénea 1: Noroccidental.	30
Tabla 4. Registro de eventos sísmicos ocurridos en Medellín.	32
Tabla 5. Listado de los 21 países más afectados por deslizamientos, relacionados en el periodo entre 1900 a 2009.	37
Tabla 6. Clasificación ingenieril de materiales litológicos	40
Tabla 7. Volúmenes de deslizamientos con diferentes profundidades de falla.	129
Tabla 8. Estado de actividad de deslizamiento	131
Tabla 9. Estado de Actividad, descripción de cada estado	131
Tabla 10. Descripción de los movimientos según la tasa de movimiento, contenido de agua y tipo de material.	133
Tabla 11. Escala de velocidad propuesta por Cruden y Varnes (1996).	134
Tabla 12. Clasificación del deslizamiento según su volumen.	136
Tabla 13. Metodología fase de planeación.	155
Tabla 14. Metodología fase de Trabajos de campo.	159
Tabla 15. Metodología fase trabajo de oficina.	164
Tabla 16. Parámetros para modelación de talud.	175
Tabla 17. Re cálculo del volumen de la masa desplazada.	180

Introducción

Para Colombia, un país en desarrollo continuo, donde la geomorfología es variable, es necesario el constante desarrollo de proyectos de ingeniería, y cada vez más, son las variables que se estudian y analizan antes, durante y después de la ejecución de cualquier proyecto. Para la Ingeniería Civil, y su rama la Ingeniería Geotécnica, se debe contar con información precisa de las propiedades, características y comportamiento de los suelos presentes.

Una fase que constituye la adecuada ejecución de un proyecto, se denomina el monitoreo, esta etapa busca conocer en el menor tiempo posible el comportamiento de las estructuras construidas, entiéndase por estructuras; toda obra realizada por el hombre que comprende partes interpuestas de materiales que cumplirán con un fin.

El monitoreo de movimientos en masa, se considera de gran importancia en proyectos donde se ha modificado la topografía inicial de la zona, donde se han realizado rellenos ingenieriles, cortes o rellenos de material (suelo o roca) y transporte del mismo, y se desea conocer las condiciones en tiempo real de dichas modificaciones, con el objeto de garantizar la integridad de las personas involucradas y del proyecto.

En la actualidad, existen diferentes metodologías en la identificación y clasificación de un movimiento en masas, cada una de estas, está relacionada usualmente con procedimientos establecidos propias de cada entidad, adicional a esto, existen un buen número de métodos y sistemas de clasificación para los diversos tipos de movimientos masivos de suelos y rocas, para ello, se ha optado por la implementación de un sistema unificado de clasificación, donde se busca evitar que eventos similares reciban nombres diferentes o diferentes tipos de eventos reciban nombres similares.

Para el estudio y control de movimientos en masa en Colombia, y como base para la clasificación de este trabajo de grado, se emplea el sistema de clasificación desarrollado por Varnes (1878) y ajustado a la geomorfología existente en el país por García (1986).

Existe una diferencia entre un deslizamiento y un movimiento en masa, de ello se hablará en el cuerpo del documento, pero se presenta en síntesis que; “un movimiento masivo de suelos es la falla de un talud la cual se divide en seis grandes grupos; caídas, volcamientos, deslizamientos, propagación lateral y flujos” (García, 1998), pero un movimiento en masa se describe como el caso en el que ocurren dos o más tipos de movimientos masivos en un solo cuerpo.

Algunas causas comunes de deslizamientos están relacionadas con las condiciones del terreno, los procesos geomorfológicos, los procesos físicos y procesos humanos, la identificación de la causa o causas principales de la inestabilidad requiere de diferentes procesos que se llevan en campo, laboratorio y oficina, y demanda de la participación de profesionales en diferentes áreas como lo son; la topografía, geología, geotecnia, hidrología y laboratoristas de suelos.

Tras la ejecución de este trabajo de grado, se identificarán el tipo de movimiento masivo, las dimensiones, la velocidad de desplazamiento; mediante observación en campo, recopilación de información existente y en campo, y el monitoreo del sitio empleando tecnología LiDAR, de esta manera se determinaran las variables más importantes del sitio y finalmente; evaluara el desempeño de emplear este método de monitoreo en deslizamientos superficiales.

Capítulo I. Riesgos geológicos “Geohazards”

Deslizamientos, inundaciones, incrementos en niveles de ríos, terremotos, y avalanchas. El mundo está en constante cambio, y este cambio representa riesgos para las comunidades, vidas humanas, infraestructura e incluso riesgos al medio ambiente, poniendo en peligros las cosas que los seres humanos consideramos importantes.

Como la vida humana se va expandiendo hasta llegar a todas las esquinas del mundo, estamos constantemente enfrentados con desafíos ingenieriles, donde encontrar las soluciones para prevenir estos riesgos es inherente.

A continuación se presenta un cuadro con los 20 países más afectados por eventos geológicos en el periodo de 1900 a 2009, sus costos indirectos y número de víctimas o presuntas víctimas.

Tabla 1. Listado de los 20 países más afectados por desastres geológicos, relacionados en el periodo entre 1900 a 2009.

País	Costo en Billones de Dólares	País	Víctimas y Presuntas Victimias
Estados Unidos	556	China	11.148.689
China	322	Rusia	6.368.439
Japón	213	India	4.570.345
Italia	67	Bangladesh	2.588.666
India	49	Corea	611.875
Corea	39	Etiopia	404.456
Alemania	35	Indonesia	235.555
Francia	33	Japón	221.699
Australia	29	Pakistán	169.777
Reino Unido	29	Irán	155.495

País	Costo en Billones de Dólares	País	Víctimas y Presuntas Victimias
España	26	Sudan	150.785
México	26	Birmania	145.687
Turquía	25	Italia	140.049
Indonesia	23	Mozambique	102.768
Irán	21	Turquía	90.754
Rusia	21	Nigeria	85.132
Taiwán	20	Cabos Verdes	85.035
Bangladesh	18	Perú	84.195
Canadá	17	Guatemala	83.083
Brasil	13	Chile	60.619
Colombia	7	Colombia	31747

Fuente: Guthrie R. H., Cuervo V. A. (1973). *Entendimiento de Riesgos Geológicos; Taludes, Ríos y líneas Costeras.*

1.1 Deslizamientos

Desastres como lo son los deslizamientos, han tomado vidas y han provocado daños económicos incalculados alrededor del mundo, se conoce el primer registro de un deslizamiento en el año 373 A.C, donde se presume la pérdida total de la población del pueblo griego de Hélice.

Los deslizamientos ocurren en todos los continentes, pero históricamente no son reportados en aquellas áreas remotas o en aquellos países sub desarrollados, donde en ocasiones, estos eventos son reportados erróneamente relacionando los deslizamientos con inundaciones o avalanchas.

Factores regionales propios de cada país, generan inestabilidades constantes, países como China, Taiwán, India e Indonesia, son los países más afectados frecuentemente por deslizamientos en el mundo. Caída de rocas, desprendimientos, deslizamientos, y flujos son los tipos de movimientos masivos más comunes en estas regiones. Los continentes

de Norte América y Sur América, se ven afectados por deslizamientos, generados en la mayoría de los casos, por las cordilleras, elevadas formaciones rocosas que generan constantemente problemas de inestabilidad, estas formaciones han sido generadas a partir de movimientos tectónicos. (Guthrie & Cuervo , 1973)

1.1.1 Geología Colombiana

Para entender las causas de los movimientos masivos, primero se debe conocer la geología Colombiana en general, ya que son dichos factores geológicos principales causantes de sus existencias.

En Colombia; La tectónica de placas que ha llevado a la formación de las cordilleras, hacen que la geología actual se defina en tres zonas con geología diferente, divididas por sistemas de fallas de tipo regional como la del Borde Llanero y la de Romeral.

La cordillera Oriental, la más joven de las tres cordilleras, es el resultado del plegamiento durante el mioceno y posterior levantamiento generado por cabalgamiento de las placas. Esta cordillera constituye una cadena montañosa de rocas paleozoicas y mesozoicas de plegamiento intenso y muy falladas, con presencia de granitos y diapiros salinos. A lo largo de esta cordillera se localizan los Macizos; Macizo de Garzón, Macizo de Quetame, Macizo de Floresta y Macizo de Santander.

Y por último, se establece la Zona Occidental; la cual presenta basamento de afinidad oceánica a diferencia de la zona central y la zona oriental que descansan sobre el basamento de composición continental. Esta importante variación en el tipo de corteza se encuentra delimitada por la Paleosutura de Romeral. Su rasgo morfológico principal es la cordillera occidental, en ella se observan lavas, basaltos, rocas ofiolíticas, que al meteorizarse formaron depósitos importantes de hierro y níquel.

Las relaciones tectónicas entre las zonas así como las unidades rocosas que las componen, caracterizan periodos geológicos de depósito, plegamiento y levantamiento diferentes.

La geomorfología actual del país es el resultado de procesos como los descritos anteriormente, estos aún siguen activos y forman depósitos de tipo aluvial y lacustre, sumándose a la actividad tectónica que sigue modificando el paisaje colombiano mediante plegamiento y fallamiento de los depósitos mencionados.

El sitio de estudio y desarrollo de este trabajo de grado, se localiza en el departamento de Antioquia correspondiente a la zona Occidental, a continuación se profundiza más en la composición geología del sitio de estudio.

1.1.2 Formaciones rocosas en zona Occidental

Se presenta un resumen de la distribución o existencia de los tipos de rocas que se encuentran en la zona occidental, se trata de dar una idea acerca del tipo de rocas predominantes;

Rocas ígneas; se encuentran en la parte sur hasta un poco más arriba de la población de Popayán, las rocas metamórficas se componen de esquistos, cuarcita, sobre todo en la parte central de la cordillera occidental, y las rocas sedimentarias; en especial se hallan calizas y areniscas en la parte norte, serranías de San Jerónimo y Baudó. (Geotecnia Vial)

1.2 Geología del sitio de Estudio

En términos geológicos, la ciudad de Medellín, y el sitio de estudio, localizado en el municipio de Bello, se sitúa en el denominado “El valle de Aburra”, la naturaleza litológica y estructural del valle como sus condiciones topográficas y climáticas lo hacen propenso a la ocurrencia de fenómenos naturales como; sismos, movimientos de vertiente, avenidas torrenciales y, en menor grado, inundaciones.

El aumento de la población que es actualmente de 3.5 millones de habitantes y la frecuente ocupación de lugares expuestos a amenazas han resultado en numerosos

desastres. La ciudad de Medellín se encuentra en una expansión de la construcción hacia los cerros o laderas del Valle de Aburra, esto ha llevado a innumerables situación de inestabilidad.



Figura 1. Valle de Aburra, crecimiento de la construcción. Fuente: Alcaldía de Medellín (2011) *Estabilidad de las laderas en el valle de Aburra Medellín - ladera suroriental*

Dadas las características fisiográficas de este valle, el espacio fue rápidamente urbanizado agotándose las zonas planas y las laderas con pendientes suaves moderadas.

1.2.1 El Valle de Aburrá

Se extiende desde proximidades del nacimiento del río Medellín, en el extremo suroccidental, hasta la zona central del departamento de Antioquia, en una longitud aproximada de 80 km hasta el municipio de Barbosa.

Valle de Aburrá es una depresión alargada que se extiende en dos tramos: uno de unos 30 km. de longitud va de sur a norte, desde Caldas hasta Bello, con un ensanchamiento máximo de unos 7 km. a la altura de Medellín. El otro, más estrecho, está orientado hacia

el noroeste, va de Bello a Barbosa y mide unos 35 km. de largo. El fondo del valle en Caldas está a unos 1800 m de altura sobre el nivel del mar y en Barbosa a unos 1400 m. Está rodeado por montañas que alcanzan unos 3000 m. como el Alto de San Miguel, el Cerro del Padre Amaya y el Cerro Boquerón y por altiplanos como el de Ovejas, el de Santa Elena, el de San Vicente Río Negro y el de Santa Rosa de Osos, situados a alturas entre 2600 m. y 2000 m (Hermelin, 2007).

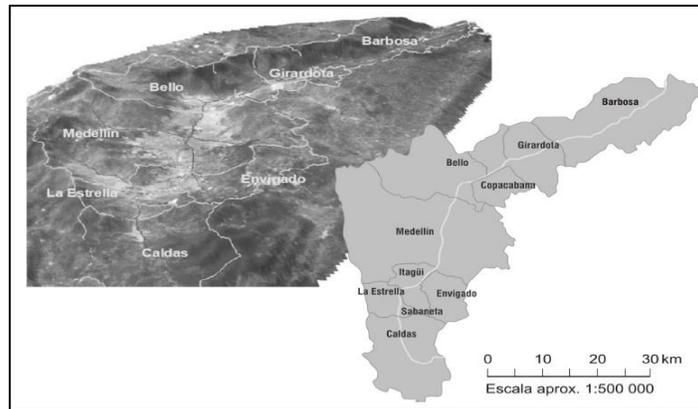


Figura 2. Mapa del Valle de Aburra en 3D. Fuente: Hermelin M. (2007) *Valle de Aburra*

El valle sigue el curso del río, que inicialmente tiene una dirección predominante norte-sur, con una ligera desviación al nororiente, y a la altura del municipio de Bello presenta un cambio brusco de dirección en donde el río tiene una dirección predominante nororiente, hasta convertirse finalmente en el río Porce a la altura del municipio de Barbosa.

1.2.2 Geología regional.

Geológicamente el área de estudio comprende el Valle de Aburrá y los altiplanos, donde afloran variadas unidades, predominantemente de rocas intrusivas, con metamorfismo de alto grado o muy deformadas que incluyen rocas de diferente edad, origen y composición. En relación con las edades, estas van desde rocas paleozoicas hasta los depósitos cuaternarios. En cuanto a su origen y composición se tienen rocas metamórficas como esquistos, anfibolitas, migmatitas y gneises; rocas ígneas como granodioritas, dunitas,

gabros y basaltos; rocas volcanosedimentarias y los depósitos de origen aluvial y de vertiente, además de los llenos de origen antrópico.

Como unidades litológicas importantes se presentan tres unidades que se extienden desde el vecino país de Ecuador y alcanzan a llegar hasta la parte norte de la cordillera Central en Colombia donde se define como un Complejo Polimetamórfico.

Tanto las unidades rocosas como los depósitos de vertiente y aluviales presentan perfiles de meteorización, donde se desarrollan suelos residuales de variado espesor con características propias, los cuales son fundamentales para apoyar una microzonificación sísmica detallada como la que se presenta en este estudio. (Estudio de Microzonificación Sísmica Detallada de los Municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado, desarrollado entre el consorcio MICROZONIFICACION 2006 y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá 2006).

A continuación se presenta La nomenclatura a la que se hace referencia en el perfil típico de la zona homogénea donde se ubica el sitio de estudio desarrollado en este trabajo de grado.

Tabla 2. Nomenclatura de depósitos de perfiles típicos del Valle de Aburra.

Qal	Depósitos Aluviales
Qat	Depósitos Aluvio Torrenciales
Qc	Depósitos Coluviales
Qfr	Flujos de Escombros y/o lodos recientes
Qff	Flujos de Escombros y/o lodos frescos
Qfm	Flujos de Escombros y/o lodos maduros
Qfs	Suelo residual de Flujos
KdA - SdA	Stock de Altavista
KgD - SgD	Gabro de San Diego
KpaM-SKpa	Anfibolitas Margen Izquierda
KcE - ScE	Stock de las Estancias
KuM - Sum	Dunitas de Medellín
KaM - SaM	Anfibolitas Margen Derecha
KPnl - SKPn	Neis de la Iguaná

Fuente: Departamento Administrativo de Planeación (Mayo de 2011) *Descripción de Zonas Homogéneas Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín,*

El sitio de estudio se ubica en la catalogada Zona Homogénea numero 1; Zona Noroccidental, la cual presenta la siguiente descripción, tomada del (Simpad, 1999)

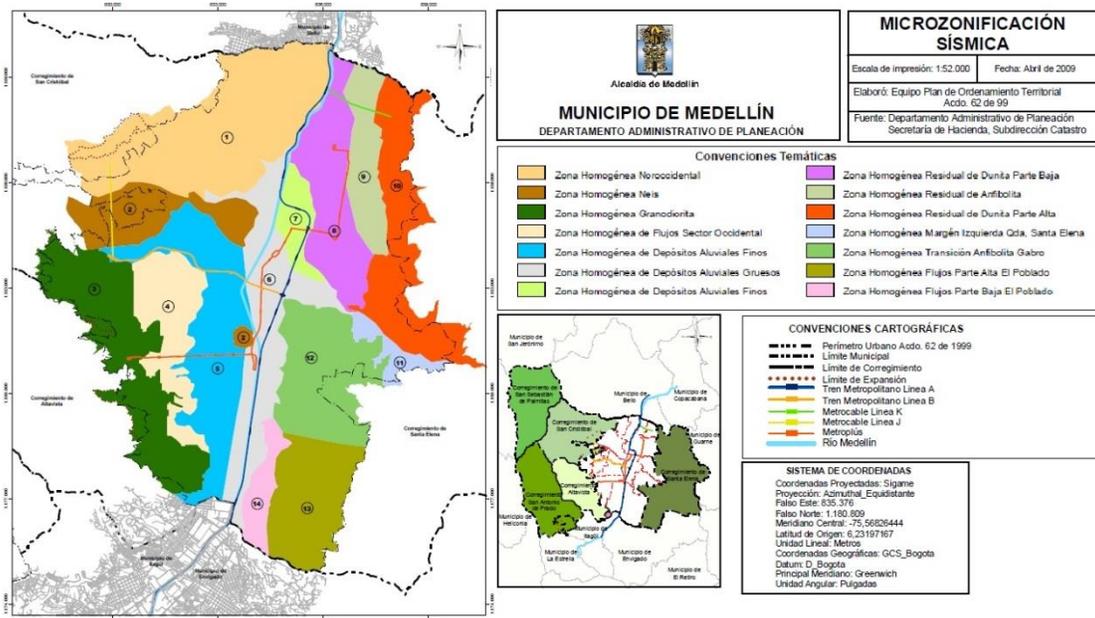


Figura 3. Áreas estudio de Micro Zonificación Sísmica Municipio de Medellín. Fuente: Departamento Administrativo de Planeación, Secretaría de Hacienda, Subdirección Catastro, 2011.

1.2.2.1 Zona Homogénea 1: Noroccidental

Comprende básicamente la comuna noroccidental de la ciudad de Medellín, limitada al norte por la quebrada La Madera, que a su vez separa los municipios de Medellín y Bello. Al oriente limita con el río Medellín hasta la calle 93, cruzando en diagonal hasta aproximadamente la calle 89 con la carrera 65 (E = 834 629 m, N = 1 186 578 m), y siguiendo hasta la calle 80 con carrera 67 (E= 834 327 m, N = 1 186 278 m), sin incluir el Cementerio Universal. Continúa por la carrera 67 hasta la transversal 78. Al sur, parte de la transversal 78 con la transversal 73 (E = 833 770 m, N = 1 185 692 m), sigue hacia la calle 65 hasta el cruce con la carrera 80 y se extiende por la quebrada La Iguaná.

Comprende el sector del Doce de Octubre con los barrios Santander, Doce de Octubre No. 1 y No. 2, Pedregal, Los Arrayanes, El Triunfo, El Progreso No. 2, Mirador del Doce, Kennedy, San Martín de Porres, La Esperanza. Igualmente, incluye el sector de Castilla con los barrios Florencia, Tájelo, Las Brisas, Toscana, Boyacá, Héctor Abad Gómez,

Plaza de Ferias, Girardot, Belalcázar, Tricentenario, Castilla, Francisco Antonio Zea, Alfonso López, parte de El Progreso y El Oleoducto. Se encuentra además en esta zona homogénea el sector de Robledo con los barrios Córdoba, Luis López de Mesa, Bosques de San Pablo, Pilarica, Facultad de Minas, Altamira, Bello Horizonte, El Diamante, Aures No. 1 y No. 2, Picachito, Picacho, Palenque No. 1 y No. 2, Villa Flora, La Pola, El Cucaracho, Robledo, Porvenir, Fuente Clara y Santa Margarita.

Los terrenos de esta zona están constituidos básicamente por una serie de depósitos del tipo coluvial, predominantemente flujos de lodos y/o escombros. Adicionalmente, presenta afloramientos locales de anfibolita y neis. El relieve de esta parte del flanco del valle está caracterizado por una morfología desde irregular a ondulada, con una pendiente suave en su parte inferior cercana al río Medellín. A medida que se asciende sobre la ladera, la morfología se torna moderada, rasgo que se conserva hasta llegar a la parte alta media del flanco del valle, a la altura de la vía que conduce de Medellín a San Pedro. A continuación se presentan los perfiles típicos que caracterizan la zona homogénea 1:

Tabla 3. Perfiles típicos que caracterizan la zona homogénea 1: Noroccidental.

ZONA 1	PERFIL No.	TIPO DE SUELO	VARIACIÓN ESPESORES (m)	OBSERVACIONES
NOR-OCCIDENTAL	1	Qal	0-5	Cubre un área muy pequeña, no es representativo
		Qfm	0-15	
		SKPa	0-10	
		KPaM	10-15	
	2	Qat	1	
		Qfm	20	
		SKPn	20	
		SKPa	10	
		KPaM	-	
	3	Qat	5-40	
		SKPa-SKPn	0-20	
		KPnl		
	4	Qc	0-10	Cubre un área muy pequeña, no es representativo
		Qal	0-40	
		SKPn	5-20	
		KPn		
	5	Qc	0-10	
		Qfm	5-30	
		SKPa-SKPn	0-20	
		KPaM		
	6	Qc-Qff	0-10	
		SKPa-SKPn	0-30	
		KPa-KPn		
	7	Qfm	30-80	Estación Pedregal (SPE)
		KPa-KPn		
	8	Qfm	10	
		Qal-Qat	10	
		SKPa-SKPn	10	
		KPa-KPn	-	
	9	SKPa	10-20	
		SKPn	10-25	
		KPnl		
	10	Qfm	15	Estación Aures (EAU). Con mayor contenido de finos que el flujo encontrada en la estación SPE
KPaM		-		
11	SKpa	30	Estación Alejandria (ALE)	
	KPaM	-		

Fuente: Departamento Administrativo de Planeación (Mayo de 2011) *Descripción de Zonas Homogéneas Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín.*

1.2.3 Sismicidad local

Tomando como referencia el estudio de Microzonificación Sísmica Detallada de los Municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado, desarrollado entre el consorcio MICROZONIFICACION 2006 y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Debido a su localización, el valle de Aburra está expuesto a una amenaza sísmica intermedia, de acuerdo con las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-10, asociada principalmente a los sismos superficiales provenientes de las sismo fuentes del noroccidente de Colombia, localizadas en el departamento del Chocó y el Urabá, a la sismicidad proveniente de las sismo fuentes profundas y superficiales del Eje Cafetero, y además, está expuesta a la sismicidad asociada a las sismo fuentes del sistema Cauca-Romeral, que tiene una actividad variable, con actividad comprobada hacia el sur del Eje Cafetero, y hacia el norte, cuando se convierte en la falla Espíritu Santo.

Debido a la proximidad del área a las sismo fuentes del sistema Cauca-Romeral, la amenaza sísmica dentro del valle es variable, de forma que hacia el extremo suroccidental la amenaza sísmica esperada es mayor que hacia los municipios localizados al oriente, como son Girardota y Barbosa.

Como consecuencia de su proximidad a sismo fuentes que han mostrado alguna actividad, el valle ha estado sometido a sismos con intensidades intermedias que han causado daños de importancia, como el sismo de Mistrató de 1979, los sismos de Murindó y Opogadó de 1992, y el sismo de Armenia de 1999. Este último sismo, que si bien no fue intenso en el área metropolitana, permitió comprobar la importancia de los efectos locales en la zona gracias a la red acelerográfica que opera en la ciudad de Medellín desde el año 1996.

En general, estos sismos fueron un llamado de atención de las consecuencias que puede tener un evento sísmico intenso en esta zona del departamento de Antioquia, sometida a una permanente presión urbanística y de expansión poblacional. A continuación se presentan los sismos históricos de mayor magnitud ocurridos en el municipio de Medellín, la información es obtenida de Servicio Geológico Colombiano (SGC) empleando la plataforma de sismicidad histórica regional.

Tabla 4. Registro de eventos sísmicos ocurridos en Medellín.

Parámetros de Consulta					
Fecha Inicial		01/06/1993			
Fecha Final		05/06/2016			
Departamento		ANTIOQUIA			
Municipio		MEDELLIN			
Total Registros		2			
Red Sismológica Nacional					
Fecha dd/mm/aaaa	Hora UTC hh:mm:ss	Magnitud MI	Departamento	Municipio	Profundidad Km
04/06/2000	17:51:12	2.6	ANTIOQUIA	MEDELLIN	62.2
18/06/2000	23:52:31	2.1	ANTIOQUIA	MEDELLIN	12.2
<p>Aunque la zona del Valle de Aburra no presenta una actividad sísmica de importancia, y los sismos históricamente registrado no han presentado magnitudes altas (>6.0), no se debe descartar el efecto de estas fuerzas en la estabilidad de los taludes.</p>					

Fuente: Servicios Geológico Colombiano Recuperado de:
<http://bdrsnc.sgc.gov.co/paginas1/catalogo/respuesta.php>

1.2.3.1 Deslizamientos Inducidos Por sismos

Los deslizamientos ocurridos por los efectos sísmicos son reales y comunes alrededor del mundo, las áreas en el territorio Colombiano con mayor ocurrencia de deslizamientos causados por sismos, se encuentran en las cordilleras, debido a la gran presencia de fallas, y actividad sísmica propias de nuestra geología.

Las ondas sísmicas, que se traducen en movimientos cíclicos, alteran las propiedades mecánicas del material, existe el triple efecto de; aumento del esfuerzo cortante,

disminución de la resistencia por aumento de la presión de poros y la deformación, asociados con la onda sísmica.

La ocurrencia de una falla en materiales secos por acción de un sismo es particularmente grave en taludes de gran altura debido al aumento en los esfuerzos en la pata del talud y la falla a tensión en la mitad superior del talud (Suarez , 1992).

1.3 Viviendas demolidas por fallas estructurales atribuidas a la inestabilidad del sitio.

Tras las visitas realizadas al sitio de estudio, se observaron viviendas demolidas debido a la afectación que causó durante años la inestabilidad de la zona, hasta el punto de ser inhabitables, también se observó la casa del viviente del lote, la cual se encuentra en muy malas condiciones pero no ha sido demolida hasta la fecha.

Los problemas de inestabilidad de la vereda de Pajarito son numerosos, se recomienda realizar un estudio de amenaza y vulnerabilidad local antes de cualquier construcción.

A continuación se presenta mediante una imagen satelital las viviendas demolidas y la vivienda habitada:



Figura 4. Ubicación de viviendas afectas por inestabilidad local. Fuente: Alcaldía de Medellín, (S. F.) Mapfis Recuperado de: https://www.medellin.gov.co/MapGIS/web/swf/MAPGIS_FLEX.jsp

Capítulo II.

Inestabilidad de Taludes

El estudio de la estabilidad de taludes, está basado en el concepto de interacción de dos tipos de fuerzas; las fuerzas estabilizantes o resistentes, que tienden a conservar su condición presente de estabilidad, y las fuerzas desestabilizantes o movilizantes, son aquellas fuerzas que alteran el estado actual de estabilidad, y ocasionan los deslizamientos.

Los deslizamientos de tierra son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los seres humanos, causando miles de muertes y daños en las propiedades, por valor de decenas de billones de dólares cada año. Los deslizamientos producen cambios en la morfología del terreno, diversos daños ambientales, daños en las obras de infraestructura, destrucción de viviendas, puentes, bloqueo de ríos, etc.

Los continentes de Norte América y Sur América, se ven afectados por deslizamientos, generados en la mayoría de los casos, por las cordilleras, elevadas formaciones rocosas que generan constantemente problemas de inestabilidad, estas formaciones han sido generadas a partir de movimientos tectónicos.

En Europa, la altura de los Alpes y montes Caucásicos, forman condiciones ideales para que ocurran los deslizamientos, condiciones muy similares a las existentes en continentes como Norte América y Sur América, atribuidas a las cordilleras.

La convergencia de la Placa Tectónica de la India, crea condiciones ideales para la ocurrencia de deslizamientos en el área central del continente de Asia, en Tayikistan, ocurrió un sismo de gran magnitud, en la provincia de Khait, donde se generó un gran deslizamiento, el cual viajó 20 kilómetros y arrasó con 20 aldeas a su paso, el saldo de víctimas fue de 7.000 personas.

En algunos casos, el número de víctimas es atribuido a otros eventos naturales y no a los deslizamientos, pese a que fueron causadas por deslizamientos, por ejemplo; en 1556 en la provincia de Shanxi en China, fue reportado un sismo, y un número masivo de víctimas (840.000 aproximadamente), la gran mayoría de estas víctimas fueron realmente causadas por deslizamientos y flujo de detritos.

Los deslizamientos causados por flujos volcánicos pueden extenderse kilómetros a través de valles, y con alcances mayores a las zonas cercanas de los volcanes, causando gran número de víctimas a su paso, un ejemplo de este desastre; fue el ocurrido en Colombia en el año 1985, en Armero, el cual fue un desastre natural producto de la erupción del volcán Nevado del Ruiz el miércoles 13 de noviembre, afectando a los departamentos de Caldas y Tolima. Tras sesenta y nueve años de inactividad, la erupción tomó por sorpresa a los poblados cercanos, a pesar de que el Gobierno había recibido advertencias por parte de múltiples organismos vulcanológicos desde la aparición de los primeros indicios de actividad volcánica en septiembre de 1985. Los flujos piroclásticos emitidos por el cráter del volcán fundieron cerca del 10% del glaciar de la montaña, enviando flujos de lodo, tierra y escombros productos de la actividad volcánica que descendieron por las laderas del Nevado a 60 km/h. Los flujos volcánicos aumentaron su velocidad en los barrancos y se encaminaron hacia los cauces de los seis ríos que nacían en el volcán. La población de Armero, ubicada a poco menos de 50 km del volcán, fue golpeado, muriendo más de 20.000 de sus 29.000 habitantes. Las víctimas en otros pueblos, particularmente en los municipios de Chinchiná y Villa María, aumentaron la cifra de muertos a 23.000.

La distribución de los desastres causados por deslizamientos, está relacionada con la proximidad a las comunidades y la densidad de la población, por ejemplo, en Canadá, la densidad de la población en relación con el área del país es de 4 personas/km², mientras que en un país que se encuentre ubicado sobre la cordillera de los Andes como Perú, la densidad de la población en relación con el área del país es de 23 personas/km², no sorprende que la mayoría de deslizamientos que causan numerosas víctimas, se presentan en países ubicados en las cordilleras de los Andes.

A continuación se presenta una tabla con los 21 países más afectados por deslizamientos en el periodo de 1900 a 2009, el número de víctimas o presuntas víctimas.

Tabla 5. Listado de los 21 países más afectados por deslizamientos, relacionados en el periodo entre 1900 a 2009.

País	Muertes Causadas por Deslizamientos (millones)
Rusia	12.427
Perú	10.450
India	4.843
China	3.532
Colombia	2.988
Honduras	2.810
Filipinas	2.696
Italia	2.585
Indonesia	2.250
Nepal	1.738
Ecuador	1.099
Japón	1.002
Turquía	680
Pakistán	627
Estados Unidos	615
Nueva Guinea	520
Tayikistán	368
República de Corea	346
Viet Nam	330
Canadá	305

Fuente: Guthrie R.H. Cuervo V.A.. (s. f.) Understanding Geohazards

2.1 Factores de inestabilidad

Los taludes generalmente pueden parecer estables, pero realmente se constituyen en sistemas dinámicos en constante cambio y evolución, algunos taludes aparentemente estables, pueden desestabilizarse con el tiempo; el cambio de las propiedades geomecánicas de los materiales a medida que se generan cambios en la mineralogía y/o en la granulometría, hacen que taludes históricamente estables, presente deslizamientos. Por lo tanto, se requiere conocer lo que compone un talud para poder diagnosticar correctamente su comportamiento.

Es importante conocer las causas o “factores” que generan la desestabilización de los taludes, de esta manera se puede llegar a la utilización del método más adecuado para su monitoreo, para conocer y entender las causas que llevan a la inestabilidad de un talud, se requiere del conocimiento de la geología, la mecánica de suelos, la hidrología, la morfología y las características ambientales del sitio, entre otros elementos fundamentales.

Todos estos conocimientos que se requieren, se denominan “factores”, el interactuar de estos factores, generan una condición única de inestabilidad en los taludes, estos factores están relacionados con las características del sitio de estudio, pueden llegar a ser características que ayuden a la estabilidad de las masas.

2.1.1 Formación geológica:

Cada formación geológica posee un determinado patrón de comportamiento. Por ejemplo: Un granito y una caliza bajo condiciones similares, desarrollan características diferentes de perfil geotécnico y presentan un comportamiento diferente de los taludes como resultado de las diversas particulares de los materiales (permeabilidad, potencial de meteorización, erosividad, etc.).

En el sitio de estudio, y tomando como referencia la información geología, se tienen espesores iniciales de depósitos coluviales, depósitos aluviales y depósitos fluvio torrenciales, los cuales al ser incrementado su contenido de humedad natural, el comportamiento de estos materiales inmediatamente cambia, y podría llegar a ser (en la mayoría de casos) un factor de inestabilidad. Si el material que conforma el talud es homogéneo, el modelo conceptual es relativamente sencillo y fácil de interpretar; sin embargo, cuando el talud está formado por varios tipos de roca o suelo, el comportamiento geotécnico del conjunto es diferente al de cada material por separado.

En los taludes donde aparecen varios materiales diferentes se debe conocer cuáles son los materiales existentes, y su comportamiento característico, al mismo tiempo, se debe analizar el comportamiento conjunto de los diversos materiales. Por ejemplo, un material permeable sobre otro menos permeable, puede generar niveles de agua que no drenan, los cuales pueden afectar la estabilidad del conjunto de materiales. Un suelo duro puede fallar al cortante o deslizarse al deformarse un material subyacente menos duro.

A continuación se presenta una tabla con la clasificación general de ingeniería de los diversos materiales litológicos.

Tabla 6. Clasificación ingenieril de materiales litológicos

Tipo de material	Formación	Características	Detalles prioritarios
Roca	Ignea Metamórfica	Rocas formadas por cristales de minerales	Estructura geológica. Fracturas.
	Sedimentaria (debe definirse el tipo de roca en la forma más detallada posible).	Rocas formadas por granos cementados, depositados en capas.	Planos de estratificación.
Roca meteorizada (saprolito)	Ignea Metamórfica Sedimentaria	Permanecen algunos rasgos de la roca pero ésta se encuentra descompuesta, en las discontinuidades.	Estructura geológica Discontinuidades Estado de meteorización.
Suelo	Residual	Roca meteorizada en la cual ya no aparecen las características físicas de la roca.	Estructura geológica. Discontinuidades. Propiedades fisicoquímicas.
	Aluvial Coluvial. Glacial Loess	Grupos de partículas o bloques de suelo o roca.	Propiedades físicas.
Materiales heterogéneos	Roca, roca meteorizada, suelo.	Mezcla de diversos materiales en un mismo perfil.	Estructura geológica. Discontinuidades. Meteorización. Propiedades fisicoquímicas.

Fuente: Suarez. J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*,

Generalmente, cada formación geológica tiene unos patrones típicos que se repiten en los diferentes taludes, en este documento se hace énfasis particular a las rocas metamórficas (rocas presentes en el sitio de estudio) y a los suelos residuales, materiales que componen el perfil estratigráfico del sitio estudiado.

2.1.2 Estructura intrínseca de cada material

La microestructura incluye la fábrica y la textura de los materiales. Esta define entre otras cosas, el ángulo de reposo del material y éste a su vez determina la pendiente máxima estable del talud. Este factor de inestabilidad se encuentra relacionado con la teoría de la resistencia al corte de los suelos; la falla de los materiales no ocurre a través de las partículas mismas, sino que se manifiesta como un movimiento relativo de sus puntos de contacto. El análisis de la estructura de suelo que comprende el sitio del estudio no se

realiza detalladamente, se conocen otros parámetros, se cuenta también con información existente de la zona y se conoce el tipo de suelo presente, información suficiente para establecer el comportamiento de la masa deslizada y su caracterización.

2.1.3 Estructura Geología

Es común que los deslizamientos ocurran a lo largo de las superficies de debilidad existentes en el suelo o la roca. A estas superficies de debilidad se les conoce como la “estructura geológica” la cual está conformada por las discontinuidades, fracturas, planos de estratificación o superficies de debilidad del macizo o talud. Los elementos de estructura geológica que más comúnmente afectan los deslizamientos son:

2.1.3.1 Planos de Estratificación

Corresponden a los planos de cambio de litología del material, propios de las rocas. Estos planos son muy importantes para la ocurrencia de deslizamientos, especialmente cuando el cambio de estratificación es brusco. Por ejemplo, mantos de arenisca (duros) sobre mantos de arcillolita (blandos).

En el sitio del proyecto, las rocas predominantes están constituidas en; rocas metamórficas como esquistos, anfibolitas, migmatitas y gneises, siendo las rocas más predominantes las anfibolitas y los gneises (El Consorcio Microzonificación y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá , 2006). A continuación se presenta la clasificación resumida de las rocas presentes de acuerdo a su origen y formación.

Rocas Metamórficas: Son el resultado del Metamorfismo o recristalización de rocas ígneas y sedimentarias. En este proceso las rocas son sometidas a cambios texturales y mineralógicos, en tal forma que sus características originales son alteradas o completamente perdidas. Como consecuencia de esto, las rocas metamórficas exhiben un alto rango de características ingenieriles y comúnmente son muy útiles como materiales de construcción.

Las características de comportamiento de los taludes en rocas metamórficas sanas dependen de sus patrones de fracturación y bandeamiento (Microestructura textura y estructura). La foliación y la esquistosidad presente en algunas rocas metamórficas las hacen muy susceptibles a la meteorización. Las rocas metamórficas más comunes son la Cuarzita, el Gneis, el Esquisto, La Serpentinita, la Pizarra, la Filita y el Mármol.

Las rocas que se clasifican como Gnesi; presentan una textura bandeada, y se caracterizan por ser rocas con granos de minerales laminares elongados con bandeo composicional, las bandas de color claro, de cuarzos y feldespatos forman microestructuras paralelas con bandas de otros minerales como biotita y hornablenda y en algunos casos piroxeno. La biotita está generalmente, acompañada de moscovita.

El ortogneis es una roca derivada del granito por metamorfismo regional y el paragneis derivado de sedimentos. Algunos ortogneisses tienen la composición de un granito o granodiorita. Los Gneisses son más resistentes que los esquistos, aunque menos que los granitos.

Las rocas Anfibolitas; es un tipo de roca metamórfica compuesta en su mayor parte de minerales anfíboles. Las anfibolitas metamórficas son más abundantes y variables que los ejemplares ígneos, siendo normalmente de textura áspera o media y están compuestas de hornablenda y plagioclasas.

2.1.3.2 Discontinuidades paralelas a la esquistosidad

Son planos de microestructura comunes en las rocas metamórficas. Estos planos representan superficies de debilidad para la ocurrencia de deslizamientos en los esquistos; y por esta razón, los esquistos son muy susceptibles a los deslizamientos.

Pliegues: La formación de pliegues en rocas metamórficas es causada por cargas tectónicas, resultando en la formación de plegamientos de la esquistosidad o estratificación. Los esfuerzos sobre la roca que ocurren durante la formación de los pliegues conducen al desarrollo de juntas. Estas juntas ocasionalmente son interrumpidas

por las juntas de estratificación o paralelas a la esquistosidad y es importante definir las características de su continuidad.

Fallas: Las fallas son un elemento muy importante de la masa de roca, debido a que en ellas ha ocurrido desplazamiento de las masas de roca. Las fallas se clasifican de acuerdo a su dirección de desplazamiento. Las fallas generalmente, actúan como camino preferido del agua debido a que comúnmente, la roca se encuentra fracturada a lado y lado de la falla. El flujo de agua, produce meteorización química así como lavado y erosión, y éstos a su vez, pueden conducir a una abertura de la superficie de la falla, formando una especie de grietas discontinuas. Estas fallas con frecuencia se encuentran rellenas de materiales.

2.1.4 La Geomorfología

Geomorfología es la ciencia que estudia las formas de la Tierra. Se institucionalizó a finales del siglo XIX y principios del XX y sus haberes se asientan en los saberes acumulados por las demás ciencias de la tierra.

La geomorfología tiene que contar primordialmente con el factor geológico que explica la disposición de los materiales. Las estructuras derivadas de la tectónica y de la litología configuran frecuentemente los volúmenes de relieve de un modo más o menos directo.

El clima introduce modalidades en la erosión y en el tipo de formaciones vegetales, de modo que la morfogénesis adquiere características propias en cada zona climática (Duque, 2003).

Para conocer el comportamiento de un talud, es preciso tener en cuenta la geomorfología, y como esta puede alterar la estabilidad del mismo.

La geomorfología refleja los procesos que están actuando sobre el talud, y los procesos pasados, no solo en el talud inestable, si no también se observa en toda la zona que lo rodea. Por ejemplo, una ladera afectada por procesos tectónicos posee una morfología

diferente a una afectada principalmente por procesos de deposición de materiales. El comportamiento de los taludes depende de las características de la geomorfología general del sector. Es de vital importancia conocer la geomorfología de la zona, tras una visita de campo o empleando métodos de captura de imágenes, conocer la ubicación de las vertientes cercanas, la topografía del sitio, y el material que componen los escarpes visibles.

Se realizaron visitas de campo antes de iniciado el monitoreo, y se recopiló información acerca de la geomorfología de la zona, también empleando bases de datos como planos, imágenes y estudios geológicos.

2.1.5 Meteorización de los materiales

La meteorización como un factor de inestabilidad, altera las condiciones de los materiales presentes en el talud;

Es la alteración de los materiales rocosos expuestos al aire, la humedad y el efecto de la materia orgánica; puede ser intemperismo¹ mecánico o de desintegración, y químico o de descomposición, pero ambos procesos, por regla general interactúan. La variación de humedad y temperatura inciden en ambas formas de intemperismo toda vez que afectan la roca desde el punto de vista mecánico y que el agua y el calor favorecen las reacciones químicas que la alteran.

Distintos factores ambientales, físicos y químicos atacan a la roca y las cuartean, disgregan y descomponen, y según el carácter de los factores que produzca, la meteorización se distingue en meteorización física y meteorización química (Duque, 2003).

Entre los factores que se deben tener en cuenta para el análisis de los procesos en los taludes, están la profundidad de la meteorización, la intensidad y el tipo de meteorización. Por ejemplo, se debe analizar si la meteorización termina en arcillas, arenas o limos. La

¹ Afectación de los materiales que se encuentran a la intemperie; acción del agua y el sol durante un tiempo prolongado.

meteorización afecta la susceptibilidad a los deslizamientos, al disminuir la resistencia al cortante o al cementar las partículas con óxidos o silicatos.

Tras las visitas realizadas al sitio de estudio, se observaron depósitos de suelos afectados por la meteorización, donde han perdido considerablemente su resistencia, por tratarse de una zona de ladera, los materiales se exponen a la intemperie constantemente.

2.1.6 Condiciones topográficas

Al incrementar la pendiente de la cara expuesta de un talud, se aumenta la fuerza desestabilizante y disminuyen los factores de seguridad al deslizamiento. Los taludes de alta pendiente, cuya topografía es así por condiciones naturales o necesidades ingenieriles, son propensos a presentar caída de material y flujos de residuos.

Se debe conocer las condiciones topográficas de un talud, para poder evaluar su estabilidad, usualmente se realiza un levantamiento topográfico con personas técnico y obrero, quienes generan un perfil topográfico del talud, cuando estas masas de suelos se encuentran inestables, es riesgoso enviar personal a campo, y es más riesgoso que camine sobre la masa de suelos, puede presentarse que la cobertura vegetal esconda grietas que podrían traducirse a trampas para el personal. En este trabajo de grado, se realiza el levantamiento topográfico del talud con evidencia de desestabilidad, empleando un equipo LiDAR, levantamiento realizado en menos tiempo y con menos personal, y el cual no requirió de recorrerla totalidad del talud, mitigando riesgos de caída o atrapamiento por grietas en la superficie.

Una vez finalizado este trabajo de campo y con la información recopilada en campo, se modelará el talud empleando métodos determinísticos (2D), y se determinarán las posibles superficies de falla del movimiento, y posteriormente el volumen del movimiento

2.1.7 El efecto del Agua

La precipitación asociada al clima, afectan considerablemente la estabilidad de un talud, la presencia o ausencia de agua en un talud define las condiciones para los procesos de meteorización física y química. Los taludes bajo diferentes condiciones climáticas forman perfiles diferentes que se comportan de forma diferente. Por ejemplo, las anomalías climáticas permiten la ocurrencia de lluvias excepcionales en zonas semiáridas que generan problemas acelerados de deslizamientos y avalanchas, o cambios es el comportamiento del clima debido a factores ambientales que pueden hacer que se incrementen las lluvias de forma acelerada, y esto cause deslizamiento.

Cada región posee un sistema de lluvias que se repite en forma similar cada año. Es común encontrar áreas donde ocurren dos períodos de lluvia con dos períodos secos, o una sola temporada de lluvias con un período seco. En la mayoría de las zonas tropicales el período de los meses de Diciembre y Enero es seco (Suarez J. , 1998).

El régimen de lluvias de una región determinada puede ser diferente al de un sitio específico dentro de la misma región, especialmente en zonas de alta montaña y se debe en lo posible, obtener la información precisa de las lluvias en el sitio del talud a estudiar, para ello, se ha consultado información meteorológica de las entidades gubernamentales del Valle de Aburra, y de entidades ambientales de Medellín, para contar con dicha información, pero la información más fácil de conseguir es la resultante de consulta gratis en el IDEAM.

2.1.7.1 Lluvias Torrenciales

Es común en las zonas montañosas, y para el caso particular de este trabajo de grado, zonas de cordilleras, la ocurrencia de lluvias de gran magnitud en un período de tiempo de una o pocas horas, se debe tener en cuenta la intensidad de la máxima lluvia o de las lluvias más fuertes en una hora, en un día, mes o año y en algunas ocasiones la cantidad

de lluvia en períodos menores a una hora, para conocer los periodos de lluvias más grandes.

Debe diferenciarse el caso de zonas de precipitación alta permanente, en las cuales el nivel de agua freática es alto y constante y un corte del terreno puede producir la falla casi inmediata del talud; y el caso de lluvias esporádicas o épocas de lluvias intensas, en donde el suelo no saturado es saturado de repente, produciéndose la falla.

En numerosos estudios se ha comprobado que el movimiento de un talud puede depender de la ocurrencia de lluvias. Para la falla de un talud puede requerirse una época de lluvias muy larga o puede ser suficiente un solo aguacero. Durante la elaboración de este trabajo de grado, se atravesó por el llamado fenómeno de El Niño, donde el comportamiento de las lluvias fue anormal a lo esperado.

2.1.7.2 Lluvias acumuladas

La ocurrencia de lluvias, durante varios días consecutivos o con pocos días de diferencia, puede producir fenómenos de acumulación de agua subterránea, debido a que el talud no ha drenado el agua infiltrada de una lluvia cuando ocurre la siguiente y se produce un fenómeno de acumulación progresiva y ascenso del nivel freático, este fue observado en el mes de Enero de 2016, donde llovió los primeros 6 días de dicho mes.

2.1.7.3 Ciclo Hidrológico en el Talud

El flujo subterráneo y los cambios en la cantidad de agua acumulada son críticos para la estabilidad de un talud, debido a que ellos controlan el balance hidrológico que puede alterar el grado de saturación y la elevación del nivel freático.

La respuesta del régimen de aguas subterráneas a las lluvias es diferente de acuerdo al talud, la formación geológica y las características ambientales, así como la granulometría de los materiales existentes en el talud.

Existe una respuesta inmediata a la lluvia por infiltración en las zonas cercanas al talud, el tiempo que se requiere para que una lluvia produzca un deslizamiento es mayor en una arcilla que en un material arenoso, debido a las diferencias de infiltración. Este tiempo es inversamente proporcional a la permeabilidad para valores constantes de los demás parámetros.

Es observable que el sitio de estudio presenta una humedad constante debido a la topografía y geomorfología, las zonas más altas contiene agua subyacente de nacimientos, las cuales llegan a afectar las zonas medias, en este caso a acelerar el deslizamiento.

2.1.7.4 Precipitaciones en zona de estudio

Para evaluar el efecto de las lluvias en el incremento del desplazamiento del deslizamiento objeto de este estudio, y poder relacionar dicha información con la información capturada en campo empleando el equipo LiDAR, a continuación se presentan las gráficas históricas del registro de lluvias presentado en la ciudad de Medellín, tomando como base para esta información el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM).

Estas graficas son descargables y de uso público en el portal; <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/graficos-seguimiento-diario-precipitacion-principales-ciudades>, donde la información del registro histórico de lluvias se muestra por cada día del mes donde ha llovido.

La primera visita al sitio del estudio fue realizada en el mes de diciembre, y el último monitoreo fue realizado en el mes de junio, a continuación las gráficas:

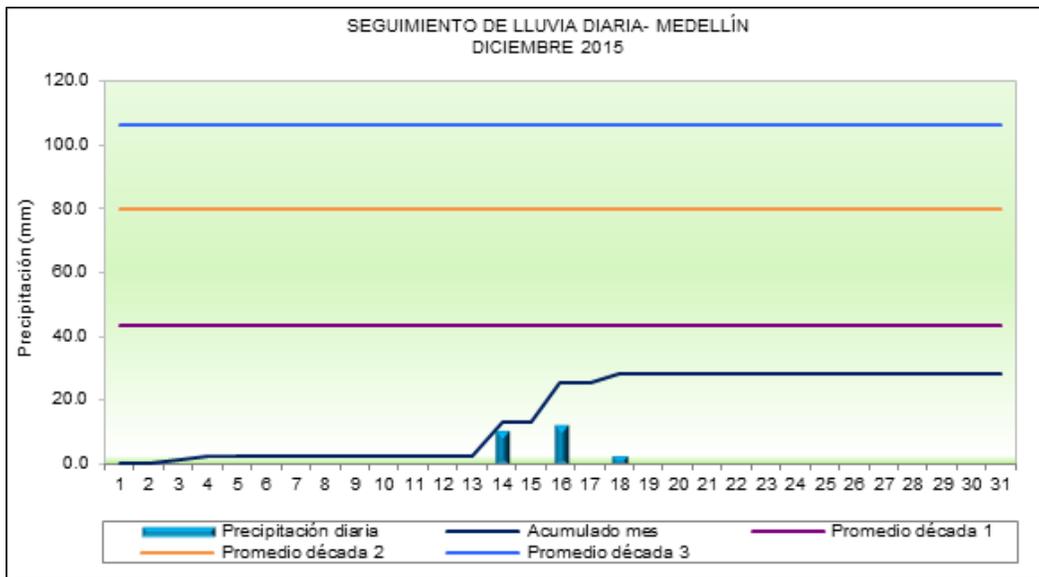


Figura 5. Historio de lluvias mes de diciembre año 2015. Fuente: IDEAM (s f.) *Gráficos seguimiento diario precipitación principales ciudades* Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/graficos-seguimiento-diario-precipitacion-principales-ciudade>

Colombia atravesó por el fenómeno de El Niño, el cual es un fenómeno de variabilidad climática que se desarrolla en el océano pacifico tropical, su efecto en el clima del país, está asociado con; una disminución de las lluvias en relación a la normal, y el aumento en las temperaturas del aire, especialmente en la región Andina y Caribe.

La disminución de las lluvias ha contribuido a la estabilidad del deslizamiento, en el mes de diciembre del año 2015, solo se registraron tres días de lluvias en todo el mes, una variación que permitió realizar visita de campo y observar el deslizamiento en una fase de “aparente inactividad.”

Justo en este mes, la vía existente que comunica a Medellín con San Pedro, fue reparada.

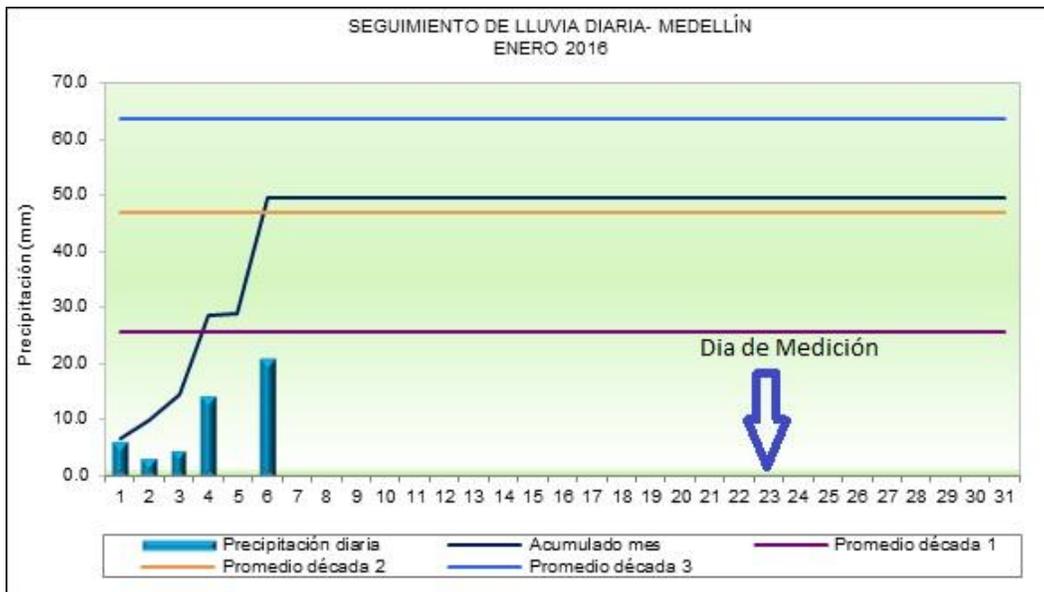


Figura 6. Histórico de lluvias mes de Enero año 2016. Fuente: IDEAM (s.f.) *Gráficos seguimiento diario precipitación principales ciudades* Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/graficos-seguimiento-diario-precipitacion-principales-ciudad>

Es evidente el efecto del fenómeno del niño en el mes de enero, las precipitaciones que se presentaron corresponden a solo 5 días del mes.

En todo el mes de enero, solo se presentaron lluvias en los primeros días 6 días, lo cual llevo a tomar la decisión de realizar el primer levantamiento y monitoreo del deslizamiento tras el efecto de lluvias consecutivas y observar en campo, las pequeñas variaciones en la superficie y obras existente tras las lluvias, en busca de señales de inestabilidad de la zona, las cuales si fueron observadas y descritas en el capítulo II.4.

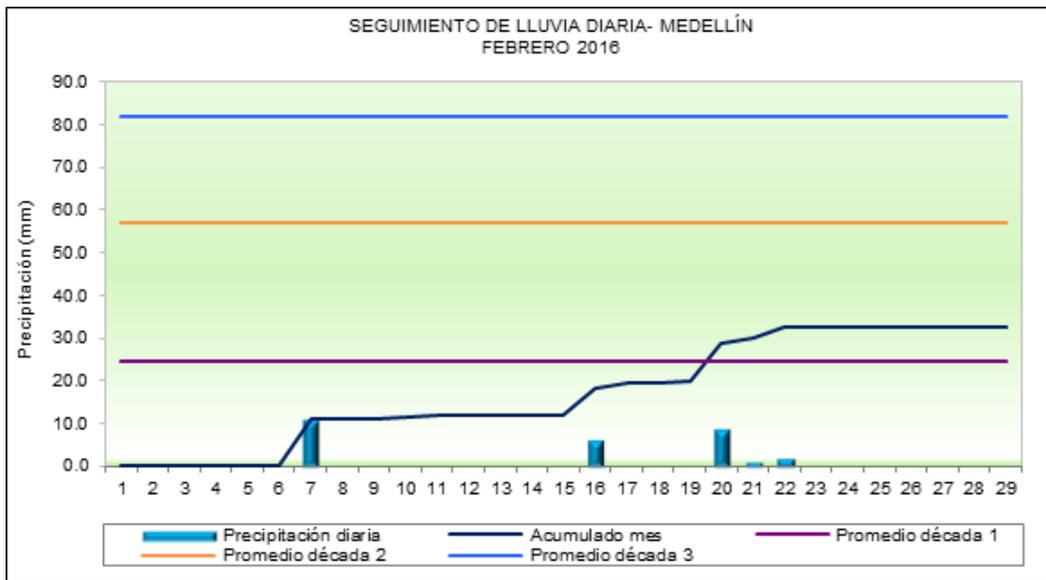


Figura 7. Histórico de lluvias mes de Febrero año 2016. Fuente: IDEAM (s f.) *Gráficos seguimiento diario precipitación principales ciudades Recuperado de:* <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/graficos-seguimiento-diario-precipitacion-principales-ciudade>

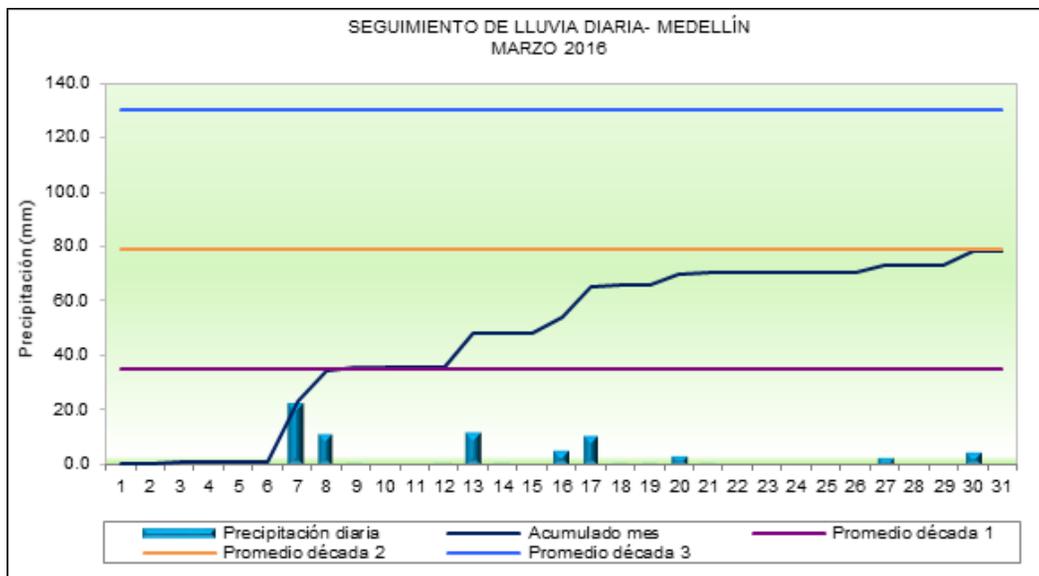


Figura 8. Histórico de lluvias mes de Marzo año 2016. Fuente: IDEAM (s f.) *Gráficos seguimiento diario precipitación principales ciudades Recuperado de:* <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/graficos-seguimiento-diario-precipitacion-principales-ciudade>

En el mes de febrero y marzo no se presentaron lluvias que se consideren lleven a la aceleración del deslizamiento, por esta razón se tomó la decisión de no hacer ningún monitoreo en este mes por la baja intensidad de lluvias.

Pero sin duda la intensidad pluviométrica se ha incrementado levemente, el IDEAM sugiere que el fenómeno El Niño se mantendría en rango de intensidad fuerte durante el primer trimestre de año 2016, y su fase de debilitamiento tendrá efectos hasta el mes de Julio.

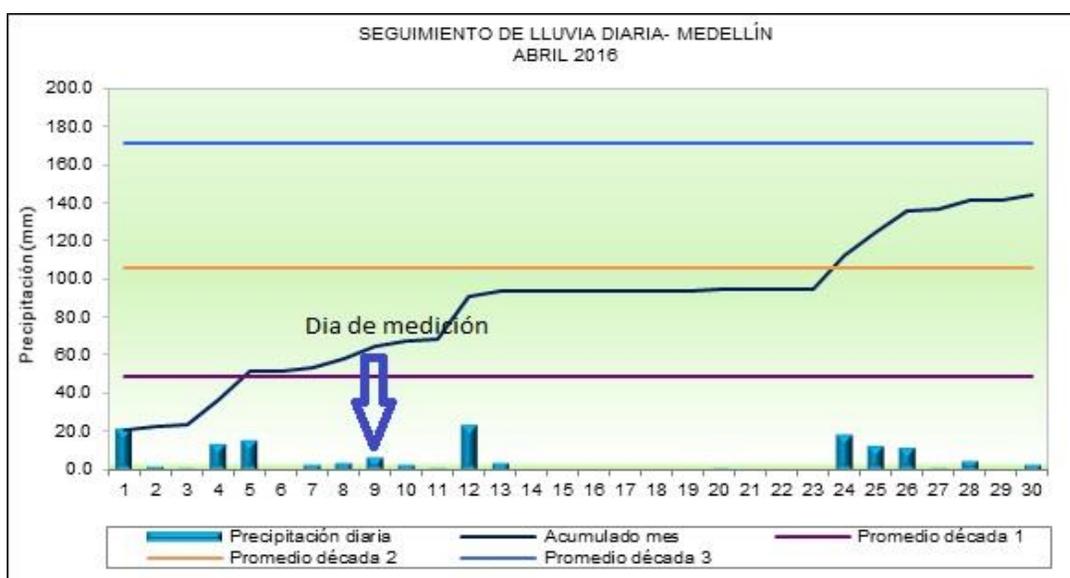


Figura 9. Histórico de lluvias mes de Abril año 2016. Fuente: IDEAM (s f.) *Gráficos seguimiento diario precipitación principales ciudades Recuperado de:*

<http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/graficos-seguimiento-diario-precipitacion-principales-ciudad>

En el mes de abril las precipitaciones se incrementaron ligeramente, se realizó el segundo monitoreo en 09 de abril, aprovechando que se presentaron lluvias durante 6 días de este mes antes. La presencia de las lluvias afectan considerablemente la estabilidad de un talud, la finalidad es determinar cambios en la superficie del deslizamiento, calcular tasas de velocidad, tipo de deslizamiento y dimensiones del mismo.

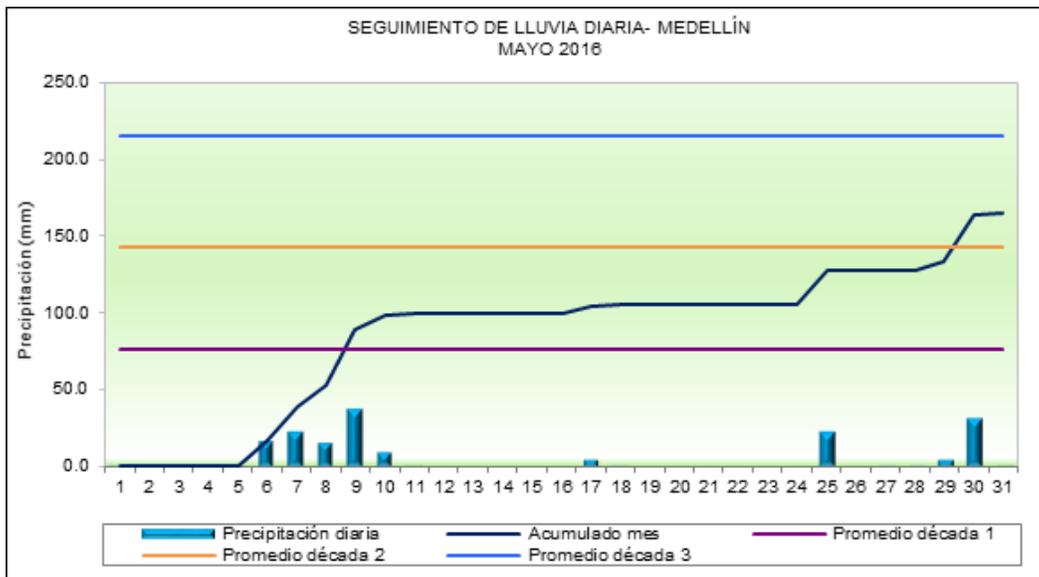


Figura 10. Histórico de lluvias mes de Mayo año 2016. Fuente: IDEAM (s.f.) *Gráficos seguimiento diario precipitación principales ciudades* Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/graficos-seguimiento-diario-precipitacion-principales-ciudad>

En mayo se presentaron fuertes lluvias en varios días de este mes, lo que indica la debilitación del fenómeno de El Niño, y es una señal clara de que regresa la época de lluvias efecto colateral del mismo, con la finalidad de tener información clara de movimiento en el deslizamiento, se tomó la decisión de no realizar ningún monitoreo durante este mes.

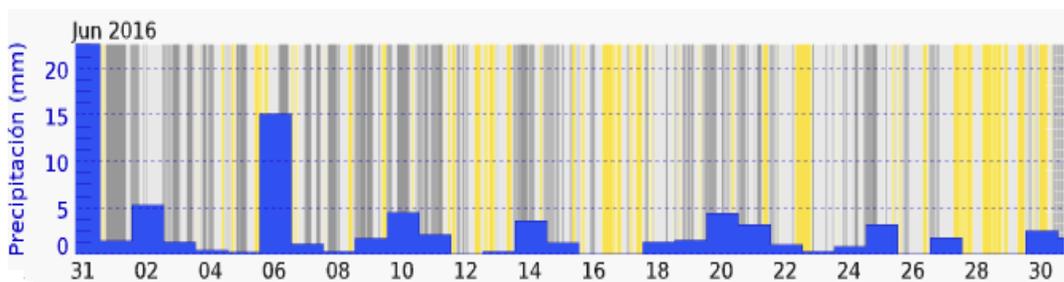


Figura 11. Histórico de lluvias mes de Junio año 2016. Fuente: Meteoblue (s.f.) *Archivo meteorológico Medellín* Recuperado de: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/pronostico/archive/medell%C3%ADn_colombia_3674962.

Finalmente se realizó el último monitoreo en el mes de Junio, el día 27, durante este mes se presentaron lluvias cortas pero constantes, lo cual ayuda a re activar deslizamientos en las zonas aledañas, en el sitio de estudio y tras visitas realizadas en dicho mes, fueron evidentes los cambios en la superficie del terreno.

2.1.8 La sismicidad

Los deslizamientos ocurridos por los efectos sísmicos son reales y comunes alrededor del mundo, las áreas en el territorio Colombiano, el área con mayor ocurrencia de deslizamientos causados por sismos, se encuentran en las cordilleras, debido a la gran presencia de fallas, y actividad sísmica propias de nuestra geología.

No se han registrados sismos en el municipio de Medellín, esta condiciones favorable para la estabilidad del deslizamiento.

2.1.9 El efecto Antrópico

El hombre ha sido un permanente modificador de los elementos que conforman la superficie de la tierra y el efecto sobre los taludes ha sido el agente desestabilizador. Las principales modificaciones causadas por el hombre y que afectan en forma importante la estabilidad de los taludes son: (Suarez J. , 1998)

La construcción de la vía que comunica a Medellín con San Pedro, la elaboración de caminos para fincas, y la construcción de viviendas sin conexión a redes de alcantarillados son factores disparadores de la inestabilidad de un deslizamiento, se observó también pobre instalación de mangueras que transportan agua y las cuales diariamente presenta fuga.

El hombre ha contribuido en este deslizamiento desde el momento que construyó la vía, pero una de las contribuciones más importantes es la deforestación observada en el lote donde se ha realizado el monitoreo y lotes aledaños, dicha deforestación con fines

ganaderos han dejado un “tapete” de suelo expuesto y sin refuerzo natural, que se desplaza lentamente cada mes.

2.1.9.1 Cambios en la topografía y cargas del talud

La modificación de la topografía del terreno mediante cortes o rellenos puede producir la activación de un deslizamiento. Un corte en un talud produce varios cambios sustanciales en el estado de la formación residual.

Las excavaciones generan cambios topográficos y concentración de esfuerzos de cortante y en ocasiones descubren superficies críticas para deslizamiento como estratificación, fracturas y planos de cambio de meteorización.

El fenómeno incluye una relajación de los niveles de esfuerzos a compresión y un aumento de los esfuerzos al corte, una exposición del material meteorizado al aire y a los cambios de humedad, alteración de propiedades por cambios físico - químicos causados por la exposición al aire y a la humedad, y modificación de las presiones negativas en el agua de los poros.

- a. Descargue del talud por remoción de suelos y rocas por corte.
- b. Sobrecarga por medio de rellenos, edificios, etc.
- c. Subsistencia o hundimiento por excavaciones subterráneas (túneles).

Corte de talud para la construcción de la vía, la cual requiere de obras de contención en un principio (muros de gaviones costado norte) pero que ahora requiere de una intervención mayor.

2.1.9.2 Cambios en las condiciones de humedad

Los procesos de urbanización producen cambios sustanciales en la situación de las aguas subterráneas. Se producen varios efectos entre los cuales se encuentra la impermeabilización y las fugas de las instalaciones de agua.

La impermeabilización debida a la urbanización disminuye la evaporación e infiltración y aumenta la escorrentía. Aunque la proporción de área cubierta es un factor clave, debe anotarse que algunos tipos de pavimentos como los adoquines y asfaltos porosos son muy permeables

2.1.9.3 Vibraciones

Las vibraciones causadas por equipos estacionados, vibraciones que emiten fábricas o plantas cercanas a zonas con taludes pueden causar inestabilidad, estas vibraciones están asociadas a las causadas por el hombre, las vibraciones generan fuerzas desestabilizantes, re acomodación de las partículas de los suelos e incremento en la presión de poros de materiales saturados.

- a. Vibraciones de máquinas.
- b. Vías de comunicación.
- c. Explosivos.
- d. Efectos de la construcción de obras (especialmente el movimiento de maquinaria).

Aunque la vía que comunica a Medellín con San Pedro presenta un tránsito promedio diario bajo, se observa que gran parte de ese tráfico consiste en vehículos comerciales (camiones), los cuales generar vibraciones sobre el deslizamiento.

2.1.9.4 Cambios en la cobertura vegetal

La deforestación ha sido identificada como un elemento muy importante de desestabilización de las laderas urbanas. La Cobertura Vegetal presente determina una mayor protección contra el impacto de la lluvia o la acción de las corrientes de agua. Adicionalmente la vegetación retarda la escorrentía regulando los picos de caudal de las corrientes.

Al eliminar la protección vegetal (cualquiera que sea ésta) se deja el terreno expuesto al impacto de las gotas de lluvia, las cuales producen erosión laminar, seguida por formación

de surcos, los cuales pueden convertirse en cárcavas. La situación se agrava aún más cuando se remueve la parte superficial del terreno o descapote la cual funciona como una segunda capa de protección natural contra la erosión y la infiltración de agua.

- a. Cambio de la estructura y condiciones de la capa superficial de suelo por prácticas de agricultura, pastoreo, tala de bosques, etc.
- b. Modificación del uso del suelo.

Deforestación con fines ganaderos, se observó en la zona.

2.1.9.5 Otros factores antrópicos

Lamentablemente en algunas situación o eventos, representa una dificultad controlar el manejo de los taludes de la población rural y urbana, se requiere de un trabajo expensivo entre las autoridades y los entes de control, las personas que viven en cercanía a los taludes no tiene en cuenta los riesgos que estos representan, y tampoco tiene en cuenta los efectos de sus acciones en los mismos.

- a. Negligencia en el manejo de los taludes.
- b. Utilización de los taludes para el paso de personas y animales.

2.1.10 El factor tiempo

La mayoría de procesos que afectan la estabilidad de un talud no ocurren en forma instantánea, sino que por el contrario toman generalmente períodos largos de tiempo.

En un talud que aparentemente es estable pueden estar ocurriendo fenómenos que conduzcan a una falla.

El clima y las condiciones ambientales cambian con el tiempo. Un talud que no presenta evidencias de movimiento en la temporada seca de las zonas tropicales puede moverse en temporada de lluvias. Un fenómeno de reptación puede con el tiempo evolucionar a un deslizamiento de traslación.

Este es el comportamiento del deslizamiento estudiado, se ha observado que durante los periodos secos, no se presenta ningún tipo de movimiento, contrario a la temporada de lluvias.

2.2 Mecanismos disparadores de deslizamientos

Un talud en condiciones naturales, está constantemente expuesto a los factores anteriormente nombrados, estos factores sumados a las propiedades y características de los materiales determina el grado de estabilidad del talud.

Cuando un talud esta sometidos a uno o varios factores, la respuesta es casi inmediata o progresiva dependiendo del tipo de estímulo que reciba, existen factores que desarrollan en el talud una respuesta casi inmediata en la forma y magnitud del deslizamiento al incrementar las fuerzas desestabilizantes o disminuir la resistencia de los materiales en forma súbita, a estos factores se les conoce como eventos disparadores.

Los factores que generan mayor impacto en la estabilidad de los taludes son las lluvias intensas, los cambios en los niveles freáticos, en el cuerpo del talud como en la pata, el incremento de los niveles de los ríos, las sobre cargas en los taludes; estas sobre cargas se pueden atribuir a factores antrópicos, las erupciones volcánicas y el factor sísmico.

Generalmente, en la búsqueda de las causas de un deslizamiento se presta más atención a los procesos que provocan la mayor tasa de cambio. Sin embargo, en algunos casos de deslizamientos, son los procesos graduales actuando durante largos periodos los que reducen la relación resistencia/esfuerzo cortante y esto lleva a la falla (García, 1998).

El actuar durante periodos de factores desestabilizantes sobre un talud, genera condiciones o etapas que se conocen como respuesta umbral.

2.2.1 Respuesta umbral

Los umbrales son condiciones, niveles o etapas que una vez superados, producen deslizamientos notables y considerables, es importante en los estudios de estabilidad de taludes, no solamente estudiar los efectos de los factores de inestabilidad, si no también tener muy presente el efecto acumulado de otras variables que actúan en los taludes y que llevan a que un talud presente una condición de umbral.

El factor de seguridad de un talud varia en relación con el tiempo y con los diversos factores desestabilizantes que en el actúen, a continuación se presenta una figura que muestra la variación del factor de seguridad en función con el tiempo, tomado de García (1998).

Se observa en la figura, que la erosión en el material que constituye el talud, representa una leve disminución en el factor de seguridad en la escala de tiempo para este ejemplo, pero se debe tener muy presente que la erosión a largo tiempo genera inestabilidad en los taludes, luego se observa como lluvias intensas en un periodo corto, disminuye el factor de seguridad, hasta la evaporación y el drenaje restante, también se observa como la erosión en la pata del talud, sumado a periodos largos de lluvias persistentes y una sobrecarga llevan a que el talud tenga un factor de seguridad igual o inferior 1, y consecuentemente a la falla.

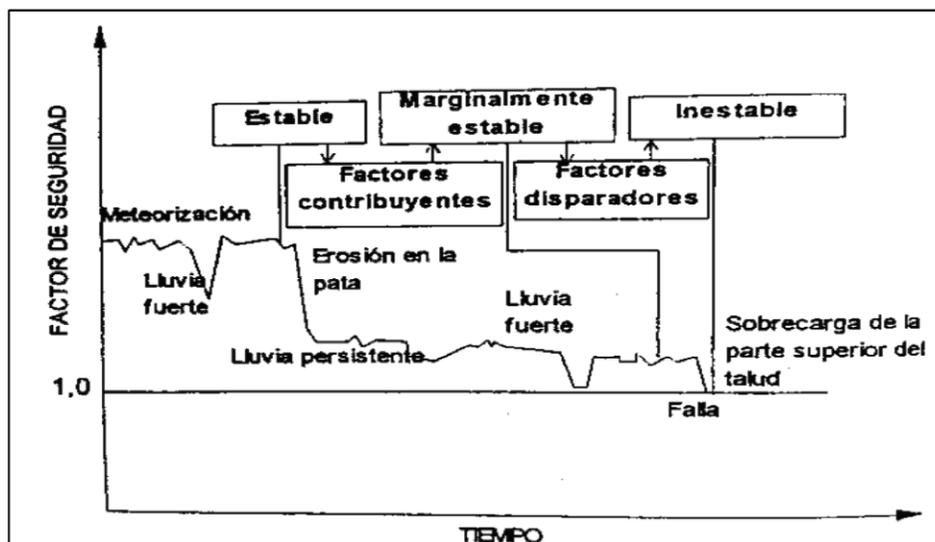


Figura 12. Respuesta Umbral de un talud Fuente: Garcia. M. (1998) *Manual de Estabilidad de Taludes*, INVIAS

La respuesta umbral de un talud, nos dice que muy pocas veces, la falla de un talud es causada por un solo factor desestabilizante, es la combinación de dos o más factores lo que lleva a la falla a un talud, las características de los deslizamientos se determinan desde el momento mismo de formación de la roca, cuando se definen sus propiedades básicas, e incluye todos los eventos orogénicos² posteriores y los efectos de la erosión y la meteorización. En la actualidad, el deslizamiento ha sido producto de la acumulación de varios factores desestabilizantes, los cuales activan y re activan el movimiento y las deformaciones en la superficie.

2.3 Identificación de señales de inestabilidad

Tras la ocurrencia de un deslizamiento, este ha dejado señales que son identificables en campo, es importante contar con personas entrenadas en la observación e identificación de señales de movimientos, al detectarse un movimiento en etapa temprana, se pueden tomar precauciones para controlar movimientos mayores, grandes fallas y evitar grandes costos de corrección.

² Proceso geológico mediante el cual la corteza terrestre se acorta y pliega en un área alargada producto de un empuje, formación de montañas y cordilleras.

Una vez identificadas las señales de movimientos en campo, se debe identificar el plano de falla del movimiento como también la longitud de la masa en sentido horizontal y vertical, se deben hacer las anotaciones pertinentes para establecer las medidas correctivas más convenientes. Las condiciones de inestabilidad de un sitio no son necesariamente obvias en la investigación de campo. En ocasiones hay evidencias claras de la inestabilidad, pero es común que una amenaza de movimiento no sea detectada a simple vista.

Existen señales en campo que evidencian la presencia de un movimiento o deslizamiento, estas señales son:

2.3.1 Grietas de Tracción

Las grietas se forman con pequeños movimientos en el talud, el suelo tiene una muy baja resistencia a las fuerzas de tensión y estas grietas se hacen evidentes con facilidad, estas grietas dependiendo de su ubicación indican que el talud natural o de corte está en su primera etapa de movimiento, las grietas formadas, permiten la infiltración de agua, incrementando la desestabilidad del talud, el agua ingresa y entra en contacto con los materiales existentes.



Figura 13. Grietas de tracción en pavimento, indicando el movimiento del talud que conforma la banca. Fuente: Propia

Si las grietas se encuentran sobre un pavimento, se podría concluir que el talud que conforma el terraplén ha presentado movimientos leves, los cuales deben ser tenidos muy en cuenta para garantizar la integridad de la banca.

2.3.2 Escarpes

Cuando se observan escarpes en los taludes, estos evidencian que el talud ya ha fallado, y se ha presentado el deslizamiento de una masa de suelo, los escarpes son fácilmente observables desde puntos bajos, y constituyen una de las señales más fuertes para la identificación de deslizamientos, los escarpes además permiten observar directamente el tipo de suelo y el espesor de la cobertura vegetal, estos escarpes permiten la infiltración

de agua directamente al talud, ablandando los materiales y acelerando una segunda fase de falla.



Figura 14. Escarpe, evidente señal de desplazamiento de material. Fuente: Propia.

2.3.3 Hundimiento de barandas y sub rasantes

Las barandas metálicas, son elementos de seguridad que se instalan a lo largo de las vías, en los costados, y delimitan el borde de la carreteera con caídas o depresiones a los costados de acuerdo a la topografía, cuando se observa un hundimiento en las barandas, es posible que se esté presentando un movimiento en el terraplén. Los hundimientos de las barandas en los accesos a los puentes son indicio de problemas de asentamientos en el terraplén o en la cimentación del puente.



Figura 15. Hundimiento de zona, se evidencia tanto en la baranda como el terraplén.

Fuente: Propia.

En los terraplenes, cuando se presenta un hundimiento, estos afectan generalmente a toda la calzada, y son fáciles de detectar, habitualmente viene acompañados por deformaciones en la carpeta de rodadura, en algunos casos estos hundimientos pueden ser asociados a problemas en las obras hidráulicas u obras de contención, pero en la gran mayoría de casos, estos hundimientos son debido a problemas de estabilidad de las masas.

2.3.4 Detritos en la vía

Los detritos son el resultante del fracturamiento y desintegración de la roca, los cuales presentan tamaños menores máximos de 2 cm de diámetro, estos detritos pueden dar una idea de la ubicación de la desintegración de la roca o ser transportados por corrientes de agua desde la parte superior de taludes, al encontrarse detritos en la carreteada, son indicio de la inestabilidad de un talud rocoso, y su evolución podría llegar a ser caída de fragmentos de roca más grandes, los detritos pueden llegar a afectar la seguridad y

serviciabilidad de una vía, se requiere de constante mantenimiento ya que son constantes en zonas inestables.



Figura 16. Detritos transportados desde la parte alta del talud, desintegración de la roca.

Fuente: Propia.

2.3.5 Abultamientos y Deformaciones Superficiales

Los abultamientos pueden presentarse sobre la calzada, en el talud arriba de la calzada o en el talud por debajo de la calzada, estos abultamientos son evidencia de la existencia de un movimiento considerable y que en ese estado podría continuar hasta que ocurra por completo la falla, los abultamientos que se ubican sobre la calzada son fáciles de detectar, ya que las deformaciones en la carpeta de rodadura y en la estructura de la vía son evidentes, pero los abultamientos en los taludes adyacentes a la calzada no son tan fáciles de detectar, y más aún cuando la capa vegetal impide su observación. Los abultamientos pueden ser interpretados también como deformaciones en la topografía de la zona, dichas deformaciones son señales evidentes en zonas con poca vegetación y no corresponden a la topografía general del área.



Figura 17. Abultamiento en la calzada, causado por el desplazamiento de la masa en el talud que se presenta, se observa como la línea de falla es continua. Fuente: Propia.

Es importante contar con un ojo bien entrenado y experiencia en campo, para identificar estas irregularidades que son señales de inestabilidad, en la fotografía anterior, se observa abultamiento en la calzada y abultamiento en el talud.

2.3.6 Alcantarillas Bloqueadas

Las alcantarillas que se encuentran mal construidas, obstruidas por vegetación o escombros o alcantarillas con inadecuada capacidad de flujo, pueden generar graves problemas de estabilidad, generando estancamiento en la pata de los taludes y terraplenes, los taludes con las patas saturadas, pierden su capacidad de resistencia al corte, y esto genera deslizamientos, también afecta las condiciones de los terraplenes y rellenos ingenieriles, y son causal de problemas de inestabilidad en zonas planas.



Figura 18. Alcantarilla bloqueada, estancamiento de aguas que genera problemas en los terraplenes y pérdida del hombro de la vía. Fuente: Propia.

El agua estancada es siempre una fuente indeseable de saturación. En los taludes de corte, pueden causar saturación y generar deslizamientos hacia la carretera. En una cuneta o en medio de la carretera puede saturar por completo el relleno y favorecer el desarrollo de planos de falla dentro del mismo. El estancamiento de agua en la cabeza de un hundimiento favorece la infiltración que va a producir presiones indeseables y a ablandar los materiales; en la pata de un terraplén puede ablandarlo, causando erosión interna y un deslizamiento.

2.3.7 Cunetas Averiadas

Las cunetas que se encuentran bordeando las calzadas o cunetas que se construyen con el fin de manejar las aguas de escorrentía, debe estar revestidas de concreto, cuando este revestimiento se avería, se inicia la infiltración del agua superficial, causando erosión y saturaciones en los materiales que constituyen los terraplenes o los taludes. Cuando el revestimiento de las cunetas se avería, se generan grietas en el concreto, causadas en muchos casos por movimiento en el material, estas grietas son señales de movimientos

de falla temprana de un talud o terraplén, las cunetas averiadas por estas causas, son fácilmente detectables en campo, en los casos más severos, estas cunetas se encuentran fracturadas, destruidas, separadas, montadas una sobre la otra, debido a los movimientos del suelo.

La tarea de reparación de cunetas puede llegar a ser una labor sin frutos a largo plazo, debido a que la deformación del suelo es continua, las cunetas reparadas fallaran nuevamente, a su vez, estos elementos que se construyen para mitigar la infiltración y dar el manejo adecuado a las aguas de escorrentía, al estar averiadas generan un efecto contrario y devastador, acelerando la saturación del suelo, generando evidentes superficies de falla.



Figura 19. Cuneta averiada, grietas y fractura de cunetas causadas por el movimiento del suelo, zona de infiltración de agua hacia la estructura de la calzada. Fuente: Propia.

2.3.8 Mal Entrega de Aguas

Las tuberías, disipadores, cunetas u otras estructuras de drenaje que evacuan las aguas de la calzada, pueden ser un factor importante para desencadenar un deslizamiento, el agua que proviene de estas estructuras puede causar erosión y esta erosión puede causar un deslizamiento, en un país como Colombia, es importante estudiar y diseñar adecuadamente estas obras de drenaje, por ser un país montañoso las aguas evacuadas logran generar grandes afectaciones a la estructura de la vía, cultivos en los taludes bajos de las vías y daños a propiedad privada entre otros.

Las obras de drenaje como alcantarillas, en el caso de no realizar una adecuada entrega a obras de disipación y filtración, pueden afectar incluso a estructuras de contención, se debe tener en cuenta el tipo de suelo que compone los taludes, algunos suelos son más propensos a la erosión y otros suelos son propensos a la expansión o contracción.



Figura 20. Mal entrega de aguas, disipador construido para evacuar las aguas de la vía, causando erosión hacia la parte baja del talud, futura inestabilidad del talud. Fuente:

Propia.

2.3.9 Nacimientos de agua

“Los nacimientos indican la intersección del nivel freático con la superficie del terreno” (García, 1998), estos sitios pueden indicar zonas con acumulación de niveles freáticos, presencia de acuíferos, empozamientos de agua creados por el movimiento. Estos empozamientos generalmente tienen formas irregulares, los nacimientos de agua en los taludes deben ser controlados con las adecuadas estructuras de drenaje, usualmente estas estructuras de drenaje tienen la capacidad de evacuar la totalidad del caudal de las aguas del nacimiento, en los proyectos que carecen de estas estructuras, las aguas brotan de manera irregular y pueden afectar la estructura de la calzada, rellenos, taludes, obras de contención y viviendas cercanas.



Figura 21. Nacimientos de agua. Fuente: Propia.

Las zonas con deformaciones en la calzada son asociadas a problemas de drenaje, exceso de aguas y posteriores deslizamientos o falla total del talud, causando pérdida de banca y problemas de seguridad y movilidad para los usuarios. En la fotografía anterior, se observa el agua que nace desde la pata del talud (margen derecha) e ingresa a la calzada, esta agua al no estar controlado acelera la inestabilidad del sitio. (Se puede

observar deformación de la calzada asociado a la humedad de la zona.) Los nacimientos de agua pueden aflorar en taludes de corte o terraplén, incluso en la estructura de la calzada.

2.3.10 Áreas con Presencia de agua

La variación de color en los rellenos y terraplenes puede indicar diferencias en el contenido de humedad de un área del talud a otra, cuando se observa un cambio en la tonalidad de un talud, debe hacerse un acercamiento y en lo posible tomar de una muestra con la mano para determinar aproximadamente su humedad, esta actividad es muy útil, a veces se descarta por completo la presencia de agua, pero una vez realizada una inspección, es posible detectar humedades en campo no detectables tras un primer recorrido.

Otro indicativo son las áreas blandas o áreas que presentan lodos en cualquier época del año, es posible detectar las zonas con contenido de agua, por la consistencia del material; materiales blandos, húmedos o lodos, indican la presencia de agua, que podría ocasionar un deslizamiento si no se tiene en cuenta para los diseños o la construcción.

2.3.11 Erosión

Las estructuras de drenaje pueden causar erosión en la pata de los taludes, removiendo el suelo de soporte y causando un deslizamiento, el agua que fluye de forma rápida en las cunetas, con frecuencia causa una erosión severa en la pata de los taludes, especialmente en los taludes de corte, tras un largo periodo de tiempo, estas cunetas acumulan residuos vegetales y basuras, o fragmentos de material del talud, se debe hacer un mantenimiento periódico a las estructuras de drenaje, para garantizar su correcto funcionamiento.

Los terraplenes y rellenos pueden sufrir de erosión, causada por aguas estancadas, deficiencia en los drenajes o saturación en la masa de suelo, la erosión es evidenciable y debe ser controlada a tiempo.

2.3.12 Estructuras existentes

Las estructuras existentes son elementos que se pueden emplear como señal de la existencia de un movimiento o deslizamiento de baja velocidad, los postes de energía, las cercas de cerramiento, viviendas y otras estructuras del hombre se ven afectadas siempre y cuando se encuentre dentro de la zona de afectación del movimiento, la inclinación, fisuramiento, o avería de estas estructuras dan una idea de la velocidad y magnitud del deslizamiento.



Figura 22. Estructuras afectadas por deslizamiento. Fuente: Propia.

Las estructuras de drenaje como disipadores o grandes canales de conducción se ven claramente afectados frente la existencia de un deslizamiento, por ser obras lineales y en concreto, son una buena referencia como señal de problemas de estabilidad. En la fotografía anterior, se observa un muro de contención tipo gaviones deformado por el movimiento de la masa, así como muros de contención en concreto y disipador, inclinados o averiados, también se observa deformación en la calzada, y en la topografía de terreno cambios de forma.

2.4 Clasificación de los Movimientos en Masa

El estudio de los taludes y deslizamientos de masa ha sido de gran interés para diferentes áreas de la ingeniería y de las ciencias, los deslizamientos varían inicialmente por los factores de inestabilidad, y seguido de ellos, los deslizamientos se clasifican de acuerdo a propiedades de forma, comportamiento, magnitud y velocidad.

Desde el punto de vista geotécnico, se establece la nomenclatura básica que se recomienda sea utilizada para el estudio de los taludes y los deslizamientos de tierra y se define la clasificación de los diferentes tipos de movimientos. En el presente trabajo de grado, se emplea la nomenclatura y la clasificación recomendada. La nomenclatura más común utilizada en las ciencias geotécnicas, se basa en los sistemas de clasificación propuestos por Hutchinson (1968) y por Varnes (1958 y 1978). Este último sistema fue actualizado por Cruden y Varnes en el "Special Report 247" del Transportation Research Board de los Estados Unidos (1996) y es el sistema de nomenclatura y clasificación más utilizado en el mundo.

A continuación se establece el vocabulario a ser empleado en el presente documento, para entendimiento del mismo.

2.4.1 Definiciones y partes de un talud y de un deslizamiento

Un talud; se denomina a una masa de suelo que presenta una pendiente o inclinación con respecto a un plano horizontal, los taludes se pueden agrupar en tres categorías generales; los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención.

Las laderas o taludes que han permanecido estables por muchos años, pueden fallar debido a cambios topográficos, sísmicos, a los flujos de agua subterránea, a los cambios en la resistencia del suelo, la meteorización o a factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad. Un talud estable puede convertirse en un "deslizamiento".

Un talud está compuesto por su parte superior llamada cabeza, escarpe o cresta, donde se presentan procesos de erosión, por una parte media que puede ser semi-recta o totalmente irregular, y por una parte baja o inferior cóncava llamada pie o pata del talud, es en la parte baja donde ocurren la mayoría de los procesos de acumulación de material por efectos de la gravedad.

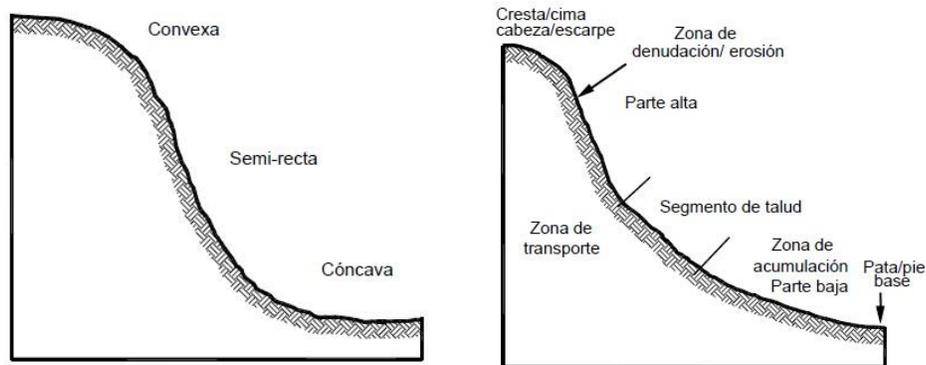


Figura 23. Partes de un talud. Fuente: Suarez. J. (s. f.) Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico

A continuación se presentan las definiciones para las partes de un talud:

Cabeza, escarpe o cresta: Cabeza se refiere al sitio de cambio brusco de la pendiente en la parte superior del talud o ladera. Es la parte más alta de un talud, cuando esta presenta un escarpe, este corresponde a la parte más alta de un talud, el manejo de aguas de escorrentía se debe hacer como método de mitigación en la cabeza, antes de llegar al cambio brusco de pendiente.

Altura del talud: Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, esta altura es fácil de tomar en taludes con topografías regulares y diferencias de alturas evidentes, y más aún en taludes con sus partes bien definidas (cabeza y pata), pero en taludes muy irregulares de gran extensión o taludes en los que no es fácilmente identificables su cabeza y pata, esta altura puede ser una tarea compleja.

Pendiente: Es la medida de la inclinación de la superficie del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en inclinaciones con relaciones verticales y

horizontales ($45^\circ = 100\% = 1H:1V$). La pendiente de los taludes está relacionada con los materiales presentes; sus propiedades físicas y mecánicas.

Pie o Pata: El pie corresponde al sitio de cambio brusco de la pendiente en la parte inferior del talud o ladera. La forma del pie de una ladera es generalmente cóncava, es allí donde se deposita el material que cae tras procesos de erosión hasta falla de taludes o caída de material.

Cuando un talud que se encuentra en aparente estabilidad, al ser afectado por factores desestabilizantes antes mencionados genera un deslizamiento, antes de entrar en la clasificación de los deslizamientos, a continuación se presentan algunos conceptos.

Los deslizamientos; consisten en “movimientos de masas de roca, residuos o tierra, hacia abajo de un talud” (Cruden 1991). En el término “deslizamiento” se incluyen tanto los procesos de erosión como los procesos denudacionales³. La naturaleza precisa del proceso no está incluida en la definición e incluye procesos que son producto de la acción de las fuerzas gravitacionales, hidráulicas, etc.

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

Las partes de un deslizamiento se mencionan a continuación (Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico, Suarez. Jaime.):

Cabeza: Parte superior de la masa de material que se mueve. La cabeza del deslizamiento no corresponde necesariamente a la cabeza del talud. Arriba de la cabeza está la corona.

³ Procesos de erosión y meteorización que afectan las rocas y suelos.

Cima: El punto más alto de la cabeza, en el contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.

Corona: El material que se encuentra en el sitio, (prácticamente inalterado), adyacente a la parte más alta del escarpe principal, por encima de la cabeza.

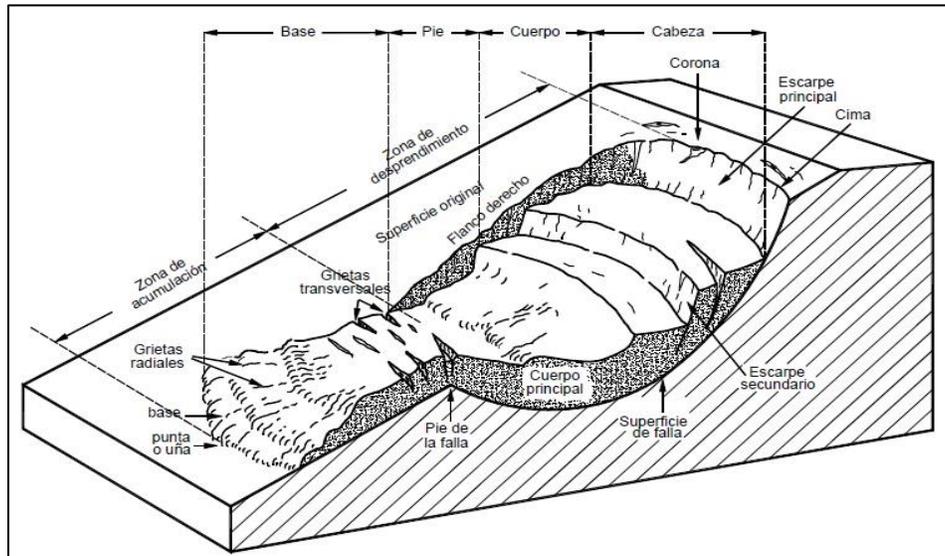


Figura 24. Partes de un Deslizamiento. Fuente: Suarez. J. (s. f.) Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico

Escarpe principal: Superficie muy inclinada a lo largo de la periferia posterior del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material conforma la superficie de la falla.

Escarpe secundario: Superficie muy inclinada producida por el desplazamiento diferencial dentro de la masa que se mueve. En un deslizamiento pueden formarse varios escarpes secundarios.

Superficie de falla: Área por debajo del movimiento y que delimita el volumen del material desplazado. El suelo por debajo de la superficie de la falla no se mueve, mientras que el que se encuentra por encima de ésta, se desplaza.

Pie de la superficie de falla: La línea de interceptación (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.

Base: El área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla.

Punta o uña: El punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.

Cuerpo principal del deslizamiento: El material desplazado que se encuentra por encima de la superficie de falla. Se pueden presentar varios cuerpos en movimiento.

Superficie original del terreno: La superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.

Costado o flanco: Un lado (perfil lateral) del movimiento. Se debe diferenciar el flanco derecho y el izquierdo.

Derecha e izquierda: Para describir un deslizamiento se recomienda utilizar la orientación geográfica (Norte, Sur, Este, Oeste); pero si se emplean las palabras derecha e izquierda, deben referirse al deslizamiento observado desde la corona hacia el pie.

2.4.2 Clasificación de movimientos en masa

Los criterios principales de clasificación de movimiento en masa, se refieren principalmente al tipo de movimiento y en segundo lugar al tipo de material. Los tipos de movimientos de falla en taludes se clasifican en seis grandes grupos:

- Caídas
- Volcamientos
- Deslizamientos
- Propagación lateral
 - Hundimientos
- Flujos
 - Reptaciones

- Movimientos complejos

A continuación se presenta la clasificación de estos seis tipos de movimientos, se presentan figuras que apoyan la interpretación.

2.4.2.1 Caídas

Caído es el desprendimiento y caída de materiales del talud. En los caídos se desprende una masa de cualquier tamaño desde un talud de pendiente fuerte a lo largo de una superficie en la cual el desplazamiento de corte es mínimo o no se da. Como por ejemplo un talud empinado o un acantilado, el material desciende comúnmente a través del aire por caída libre, el material también puede descender a saltos o rodando. Los caídos de suelo, en escarpes semi-verticales, representan un riesgo importante para los elementos que están debajo del talud, los movimientos que generan la caída de material son muy rápidos a extremadamente rápidos y pueden estar o no precedido de movimientos menores que llevan a la separación gradual de bloques o cuñas.

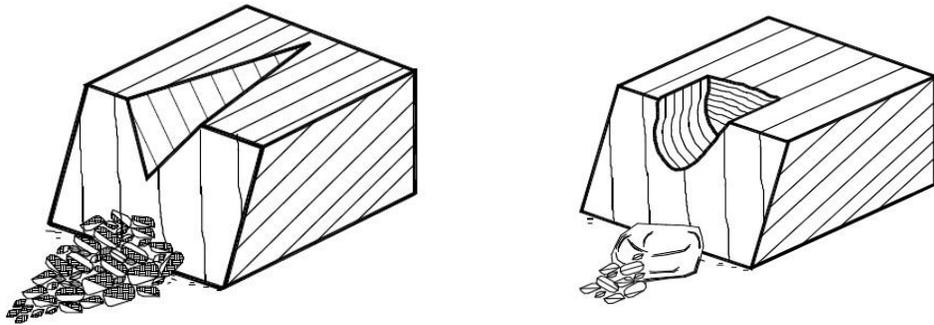


Figura 25. Caída de Residuos y Caída de roca. Fuente: Suarez. J. (s. f.) Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico,

La caída de material esta compuestos de suelo hasta roca, partículas de suelos y bloques de roca de varios metros cúbicos, en algunos casos, el material rocoso o de suelo que cae, se rompe en fragmentos más pequeños, el material rocoso que cae corresponden a bloques de roca relativamente sana; loa caída de residuos o “detritos”, están compuestos por fragmentos de materiales pétreos y la caída de tierra, corresponden a materiales

compuestos de partículas pequeñas de suelo o masas blandas. Los desprendimientos de suelo ocurren en taludes de muy alta pendiente, especialmente en las terrazas producto de depósitos aluviales.

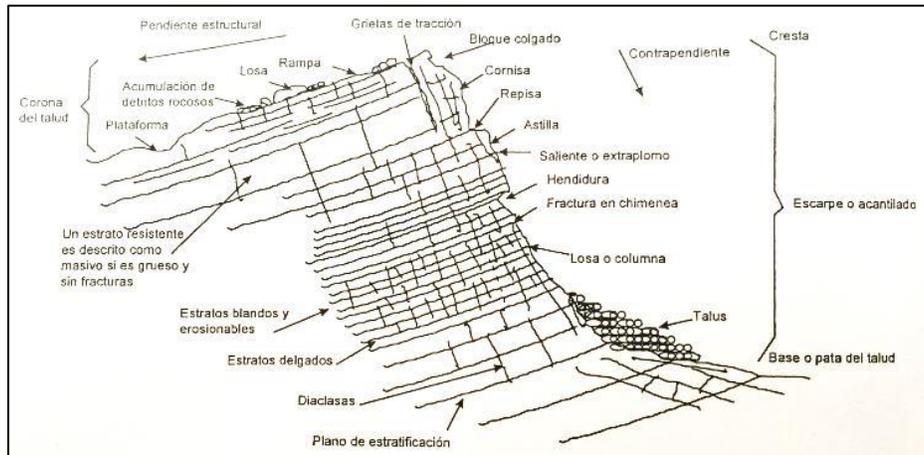


Figura 26. Formación de caída de material. Fuente: Garcia. M. (1998) Manual de Estabilidad de Taludes, INVIAS,

La observación muestra que los movimientos tienden a comportarse en caída libre cuando la pendiente superficial es mayor de 75° . En los taludes de ángulo menor, generalmente rebotan los materiales y en los taludes de menos de 45° , los materiales tienden a rodar.

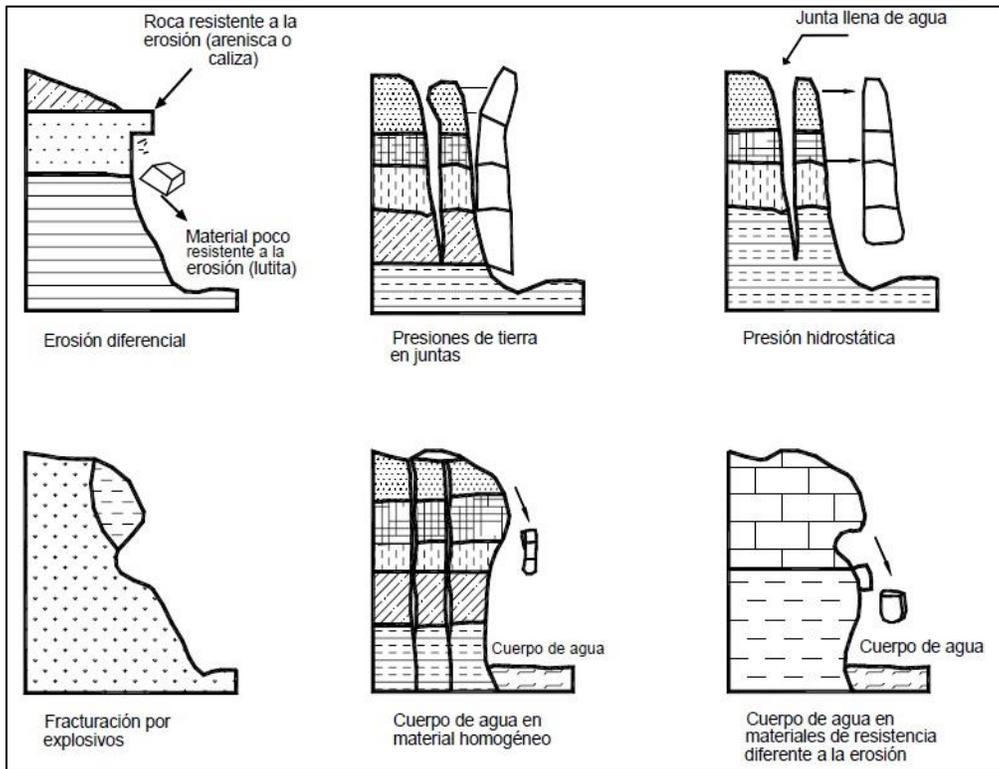


Figura 27. Factores que propician la caída de rocas. Fuente: Suarez. J. (s. f.)
Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico,

En zonas de cambios climáticos muy constantes, la degradación de la roca se acelera, e incrementa la probabilidad de la ocurrencia de caídas, otros factores son los antrópicos (obras de ingeniería) y los factores sísmicos.

2.4.2.1.1 Talus, coluviones y otros depósitos

En Colombia, es frecuente que se presenten problemas de inestabilidad de depósitos de ladera, que en muchas ocasiones ocupan extensiones considerables, cuando esto ocurre por largos periodos, se generan depósitos de tipo talus, acumulaciones de fragmentos rocosos en el pie de taludes con inclinaciones pronunciadas y en especial los coluviones, o conjunto de detritos de roca y suelo procedentes ya sea de la degradación natural de laderas empinadas sometidas a alteración libre, o de antiguos deslizamientos y flujos de tierra o de detritos.

En terrenos de origen sedimentario los coluviones pueden estar formados por bloques de las rocas más duras existentes en un sitio, por ejemplo; un coluvión compuesto de roca caliza con cementante arcilloso o limoso que son producto de la desintegración de rocas más blandas.

2.4.2.2 Volcamientos

Consiste en la rotación hacia adelante de una unidad de material terreo o varias unidades de material térreo, con centro de giro por debajo del centro de gravedad por acción de la gravedad y de fuerzas ejercidas por unidades de material terreo adyacentes de la unidad, o por fluidos en las grietas.

Generalmente, los volcamientos ocurren en las formaciones rocosas, pero también, se presentan en suelos cohesivos secos y en suelos residuales. La inclinación puede abarcar zonas muy pequeñas o incluir volúmenes grandes hasta de varios millones de metros cúbicos.

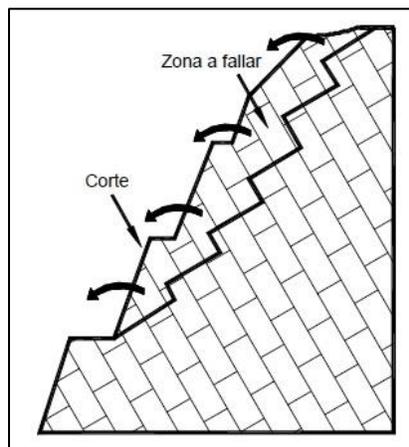


Figura 28. Volcamiento de material en talud. Fuente: Suarez. J. (s. f.) Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico,

“Por lo general, los volcamientos son lentos a extremadamente lentos al inicio y aumentan de velocidad con el tiempo. A menudo, terminan en caídos de roca o residuos, derrumbes (caídos de suelo) o flujos. En los volcamientos de roca, las

fracturas definen las características del movimiento. En las inclinaciones del suelo las grietas de tensión, la cohesión de los materiales, la altura y la pendiente de los taludes, determinan el volumen de la masa, la magnitud del movimiento y la posibilidad de desmoronamiento, caído o flujo” (Suarez J. , Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico).

2.4.2.2.1 Modos de Volcamiento

Se pueden diferenciar tres tipos de volcamiento:

Volcamiento a flexión: Columnas continuas se rompen y separan unas de otras en flexión a medida que se inclinan hacia adelante.

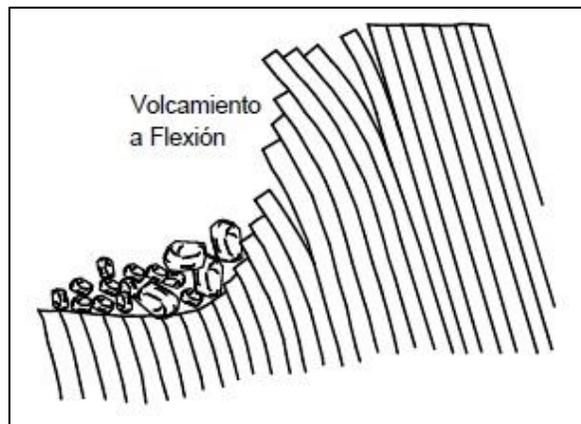


Figura 29. Volcamiento a Flexión. Fuente: Suarez. J. (s. f.) Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico,

Volcamiento en V invertida: Consiste en la inclinación múltiple de una serie de bloques con centro de giro en la superficie inferior del sistema de volcamiento, el cual puede convertirse en una superficie de falla.

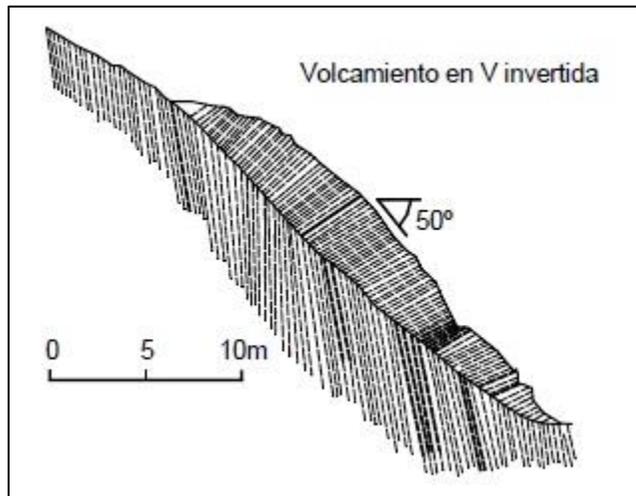


Figura 30. Volcamiento en V invertida. Fuente: Suarez. J. (s. f.) Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico,

Flexión en bloque: Flexión continua de columnas largas a través de desplazamientos acumulados a lo largo de las numerosas juntas.

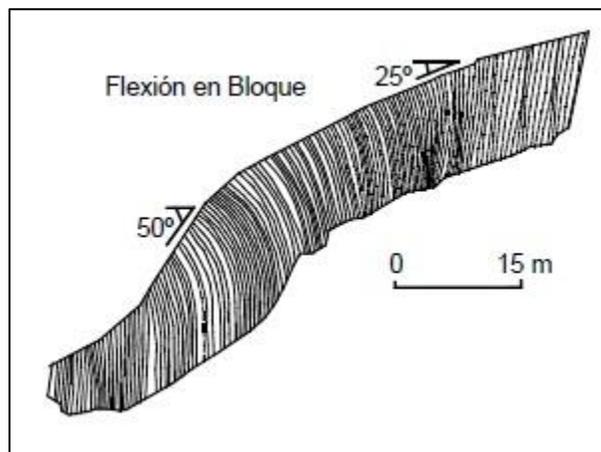


Figura 31. Volcamiento Flexión en Bloque Fuente: Suarez. J. (s. f.) Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico,

2.4.2.3 Deslizamientos

El deslizamiento es deformación del material, por corte y desplazamiento, a lo largo de una o varias superficies de falla que son visibles o pueden inferirse de forma razonable, o dentro de una zona más o menos estrecha. Los deslizamientos en masa pueden ser de una sola masa coherente que se mueve, o pueden comprender varias unidades o masas semi-independientes. La rotura del talud no siempre es simultánea en todos los puntos de la superficie de falla, si no que puede propagarse desde una zona de falla local. La masa afectada puede deslizarse más allá de la superficie original de rotura sobre el terreno natural.

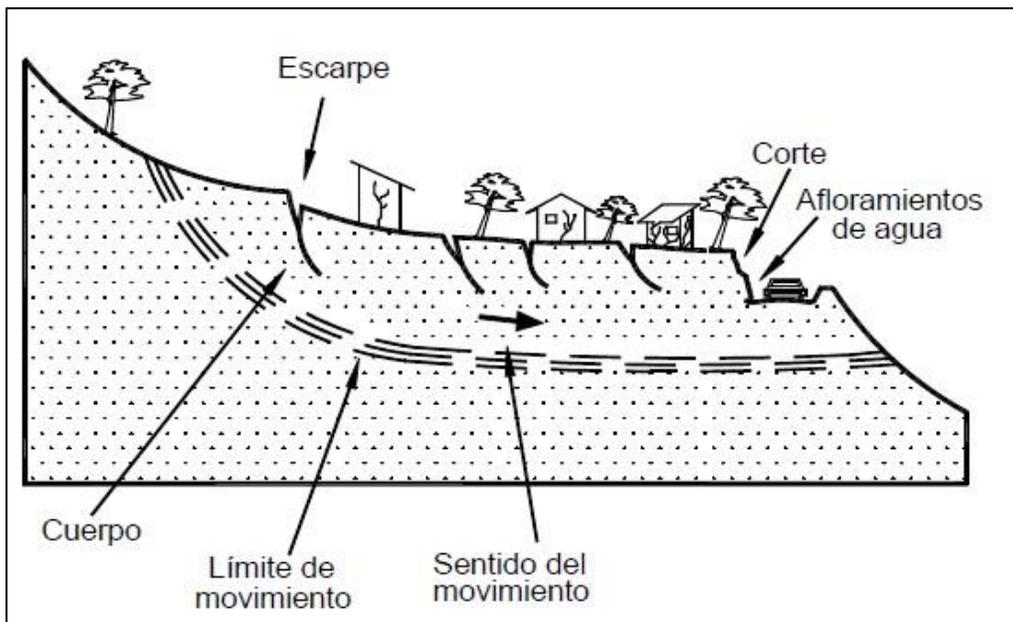


Figura 32. Deslizamiento en suelo blando Fuente: Suarez. J. (s. f.) Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico,

Los deslizamientos se clasifican en; deslizamientos rotacionales, deslizamientos traslacionales o planares y deslizamientos compuestos de rotación y traslación. La correcta clasificación es fundamental para el análisis de estabilidad como el diseño de medidas correctivas. En adición a la clasificación, se puede indicar el grado de alteración de la masa afectada por medio de los términos "en bloque" o "intacto" para deslizamientos

que consisten en uno o pocas unidades y los términos “roto” o “alterado”, “remoldeado”, “desintegrado”, “desplazado”, “desmoronado” u otros, para aquellos que consisten en muchas unidades.

2.4.2.3.1 Deslizamiento Rotacional

Es un deslizamiento de masa de suelo, a lo largo de una superficie cóncava bien definida. El movimiento es en esencia de rotación a lo largo de un eje paralelo al talud, y es por lo general profundo en suelos homogéneos de gran espesor, como en muchos coluviones, capas arcillosas gruesas, rellenos, terraplenes y botaderos. Los deslizamientos rotacionales poseen una serie de agrietamientos concéntricos y cóncavos en la dirección del movimiento. El movimiento produce un área superior de hundimiento y otra inferior de deslizamiento, lo cual genera, comúnmente, flujos de materiales por debajo del pie del deslizamiento. La cabeza del movimiento oscila hacia atrás y los árboles se inclinan, de forma diferente, en la cabeza y en el pie del deslizamiento.

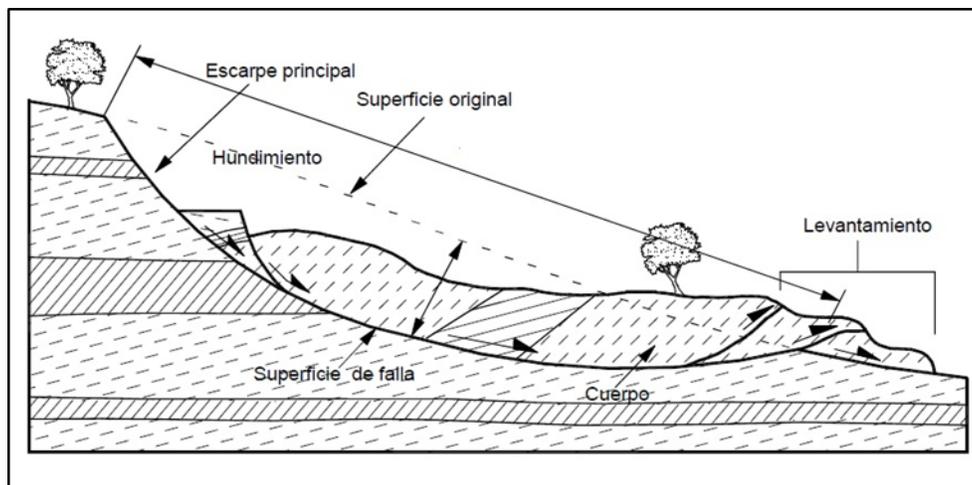


Figura 33. Deslizamiento rotacional. Fuente: Suarez. J. (s. f.) Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico,

En la cabeza del movimiento, el desplazamiento aparentemente es semi-vertical y tiene muy poca rotación. No obstante, se puede observar que la superficie original del terreno

gira en la dirección de la corona del talud, aunque otros bloques giren en la dirección opuesta.

La formación de los escarpes semi-verticales en los deslizamientos de rotación facilita la ocurrencia de movimientos retrogresivos⁴ o progresivos hacia arriba.

En los casos de deslizamientos rotacionales de mayor gravedad, se pueden observar varios escarpes, hundimientos y perturbancias sucesivas en el cuerpo del deslizamiento; en la pata se llegan a generar flujos de tierra e incluso flujos de lodo. En zonas montañosas, el deslizamiento rotacional es notorio en las superficies irregulares y la profundidad de la roca sana, el movimiento ladera abajo puede ser alterado o resistido por cambios en el relieve.

2.4.2.3.2 Deslizamiento Traslacional

Movimiento de espesor delgado de fragmentos de roca, mezclas de suelo y roca fracturada, coluvión, suelo, material orgánico y vegetación, a lo largo de una superficie casi plana, bien definida. En el desplazamiento de traslación la masa se desliza hacia afuera o hacia abajo, a lo largo de una superficie ligeramente ondulada y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo. En muchos desplazamientos de traslación, la masa se deforma y/o se rompe y puede convertirse en flujo, especialmente en las zonas de pendiente fuerte.

Los más comunes son los conformados por rocas y detritos, a los movimientos sobre discontinuidades sencillas en roca, se les denominan deslizamientos de bloque, los cuales conforman grupos de unidades coherentes.

⁴ Avance del movimiento de abajo hacia arriba, generación de nuevos escarpes y superficies de falla desde la pata del talud hacia la corona.

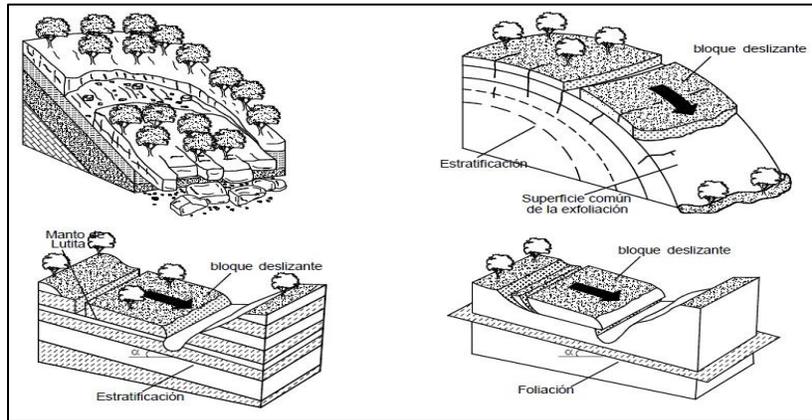


Figura 34. Movimientos de Traslación controlados por superficies débiles. Fuente: Suarez. J. (s. f.) Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico,

Cuando este tipo de deslizamiento ocurre a lo largo de dos discontinuidades, se les conocen como deslizamientos de cuña y cuando se presentan sobre varios niveles de una familia de discontinuidades, se les puede denominar falla en escalera.

En los suelos residuales, los deslizamientos de traslación, pueden ser generados por efectos de la meteorización en estratos más profundos, las superficies de falla generalmente coinciden con las zonas donde se ha perdido parte de la resistencia al corte de los materiales, está perdido se atribuye a efectos del factor meteorización.

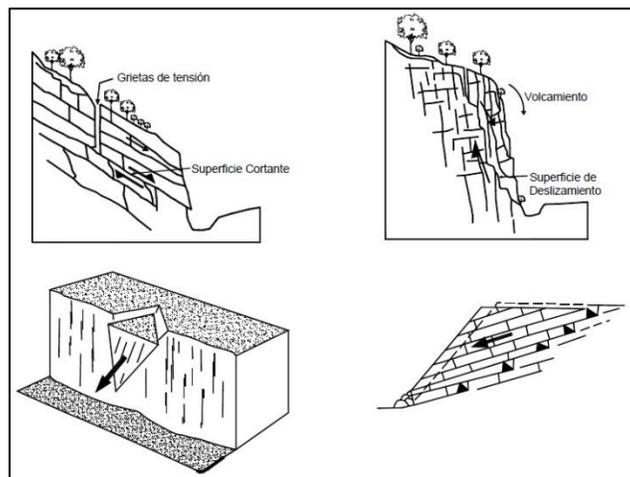


Figura 35. Movimientos de Traslación controlados por el estado de la roca. Fuente: Suarez. J. (s. f.) Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico,

Es importante identificar el tipo de movimiento que se está presentado, esto para tomar una decisión del método de estudio, monitoreo y estabilización del movimiento.

Una de las diferencias entre un deslizamiento de rotación y un deslizamiento traslaciones que; En un movimiento de rotación, la masa trata de auto-estabilizarse, mientras en uno de traslación, puede progresar indefinidamente a lo largo de la ladera hacia abajo.

2.4.2.4 Propagación Lateral

Con frecuencia se presentan movimientos que no se pueden clasificar como un tipo de deslizamiento, tampoco como caído o volcamiento, pero pueden presentar varios tipos de movimiento en un solo deslizamiento. A estos movimientos se les conoce como “compuestos”, los movimientos de tipo propagación lateral, es uno de ellos, la mayoría de los movimientos incluyen varios tipos de desplazamiento, aunque sólo predomina uno.

Los movimientos tipo Propagación Lateral, son movimientos cuyo componente principal son movimientos laterales en taludes de baja pendiente, esta propagación lateral puede ser generada por fracturas de corte y tensión sobre roca o sobre suelo plástico.

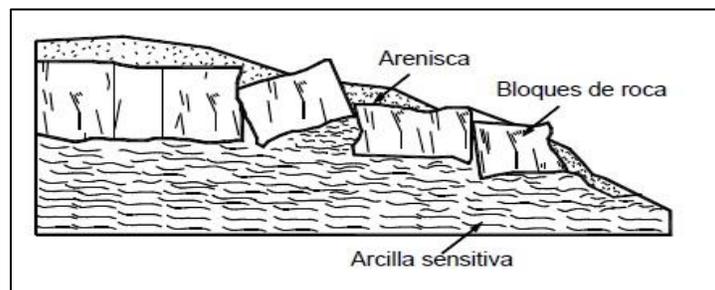


Figura 36. Esquema de propagación lateral de bloques de arenisca. Fuente: Suarez. J. (s. f.) Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico,

La propagación lateral es común en los sedimentos glaciales y marinos, pero no lo son en las zonas de suelos tropicales residuales. El mecanismo de falla de una propagación lateral puede incluir además, elementos de rotación, traslación, o de flujo sobre materiales plásticos.

Generalmente, los movimientos son complejos y difíciles de caracterizar. La rata de movimiento es extremadamente lenta. La falla es progresiva; que se inicia en un área local relativamente pequeña y progresa rápidamente a áreas mayores.

2.4.2.5 Hundimientos

Los hundimientos son movimientos verticales de masas de suelo, done se observa un cambio diminutivo del volumen superficial, los procesos de hundimiento de gran magnitud se clasifican como parte de los movimientos en masa o deslizamientos, aunque para su ocurrencia, la presencia de un talud no es necesariamente un pre-requisito, estos hundimientos pueden ocurrir en terraplenes, rellenos y otras obras de ingeniería. Existen varias causas que generan los hundimientos, a continuación se presentan (Suarez J. , Deslizamientos, Tomo 1, Capitulo 1, Análisis Geotécnico).

2.4.2.5.1 Hundimiento por Deformación Geológica ("Sagging")

Conocidos en la nomenclatura internacional como "sagging" (Hutchinson, 1988), consisten en deformaciones profundas, en gran escala, bajo la influencia de la gravedad. Se presentan en macizos de roca aparentemente competente donde han ocurrido procesos internos de cambio de esfuerzos, a continuación se muestran los principales tipos de hundimientos por deformación geológica.

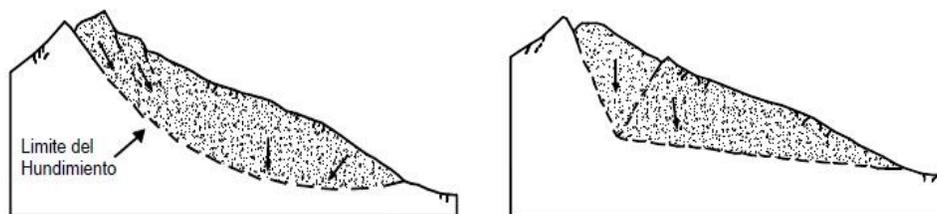


Figura 37. Esquema de Hundimientos por deformación geológica. Fuente: Suarez. J. (s. f.) Deslizamientos, Tomo 1, Capitulo 1, Análisis Geotécnico,

2.4.2.5.2 Depresión por Subsistencia “Formación de cavernas y sinkholes”

La subsidencia consiste en el hundimiento generalizado del terreno. Los movimientos masivos de subsidencia se dan desde muy lentos a rápidos y pueden ser relacionados con diversas causas naturales entre las cuales se encuentran las formaciones solubles o kársticas y la explotación de aguas subterráneas.

En Colombia, estos hundimientos pueden estar relacionado también a formaciones de rocas calizas, las cuales al entrar en contacto con el agua se disuelven generando cavernas, otra causas de estos hundimientos se puede atribuir a la existencia de minas abandonadas, las cuales generan hundimientos a su copalso (García, 1998).

2.4.2.5.3 Hundimientos y desplazamientos confinados por cambio de presiones de poros.

Con relativa frecuencia ocurren hundimientos y desplazamientos dentro del terreno, en condiciones confinadas o semi-confinadas, sin que se presenten superficies de falla completas. Estos desplazamientos obedecen a deformaciones o reacomodo interno de las partículas al aumentar la presión de poros o disminuir las tensiones negativas.

En este tipo de movimiento del terreno se presentan agrietamientos, hundimientos y levantamientos del terreno. El caso más común es el de los rellenos detrás de los muros de contención.

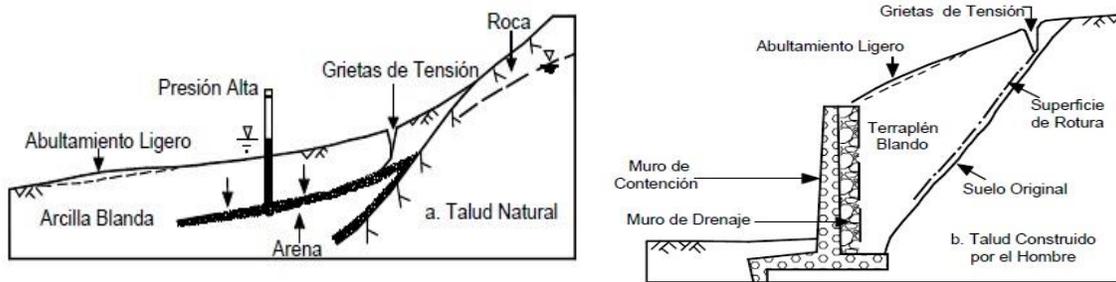


Figura 38. Hundimientos por desplazamientos por cambio de presiones de poros. Fuente: Suarez. J. (s. f.) Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico,

2.4.2.5.4 Hundimiento de terraplenes

Existe una tendencia de los terraplenes a experimentar cambios de volumen y asentamiento o hundimiento. Generalmente, estos movimientos del talud están relacionados con deficiencias en el proceso de compactación, la falta de confinamiento lateral, problemas en las propiedades de los materiales, presencia de agua, o efectos sísmicos en el material. Con frecuencia, los hundimientos de terraplenes generan agrietamientos longitudinales, los cuales eventualmente pueden inducir deslizamientos de los taludes laterales. Si el terraplén se encuentra sobre suelos licuables se puede producir su colapso en un sismo de gran magnitud.

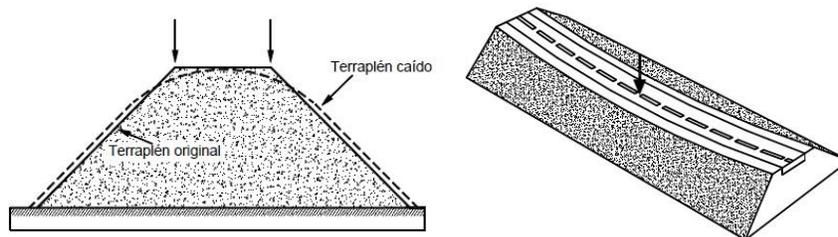


Figura 39. Esquemas de hundimiento de terraplenes. Fuente: Suarez. J. (s. f.) Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico,

Estos hundimientos son las más reconocibles y comunes en las vías nacionales de Colombia, pueden ser atribuidos también a problemas geológicos mucho más grandes, que afecta al terraplén.

2.4.2.6 Flujos

En un flujo existen movimientos relativos de las partículas o bloques pequeños dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla. Los flujos pueden ser lentos o rápidos, la velocidad del flujo está relacionada con la topografía, tipo de material y humedad presente, los flujos también puede ser secos o húmedos y los puede haber de roca, de residuos o de suelo o de tierra. La ocurrencia de los flujos puede estar relacionada con los siguientes factores (Suarez J. , 1998).

Lluvias: Las lluvias como factor desestabilizante satura los materiales subsuperficiales, alterando los estados de consistencia de los suelo finos, o de las partículas finas que compongan un suelo, haciendo que de un estado semi-sólido, pasa a un estado semi-líquido o líquido al incrementar el contenido de humedad. Puede convertir el suelo en un fluido viscoso.

Deshielo de Nevados: El deshielo de los nevados puede activar flujos de materiales volcánicos, conocidos con el nombre de “Lahares”, caso lamentable ocurrido en 1985 en Armero Colombia, donde se presentó un deshielo del volcán Nevado del Ruiz, provocando un flujo de gran velocidad, donde perdieron la vida 23.000 personas aproximadamente.

Efectos Sísmicos: Otro factor desestabilizante y provocador de flujos son los sismos; Los eventos sísmicos pueden generar un desprendimiento generalizado de bloques de roca que podrían terminar en un flujo. Igualmente, la licuación de los suelos puede terminar en flujos de suelo o lodo, licuaciones o ablandamiento cíclicos de materiales en las coronas de los taludes, pueden generar grandes flujos y afectaciones enormes, Colombia por su ubicación geográfica, está expuesta a constantes eventos sísmicos, estos generan ondas que viajan y re acomodan las partículas de los materiales, eliminando en muchas ocasiones las fases gaseosas y las fases sólidas de los suelos, generando una repentina pérdidas de la resistencia a los esfuerzos cortantes, esto ocasiona la falla de los materiales y posteriormente generación de flujos.

Alteración de suelos sensitivos: Algunos flujos resultan de la alteración de suelos muy sensitivos, tales como los sedimentos no consolidados. Las arcillas de origen marino son generalmente muy sensitivas o rápidas. El lavado de la sal, facilita el colapso de la estructura de la arcilla y la formación de flujos, por la infiltración de agua.

Los deslizamientos en zonas de alta pendiente: Al presentarse un deslizamiento de traslación o de rotación en una ladera de alta pendiente, existe la tendencia a la formación de un flujo al adquirir velocidad las masas de suelo desprendidas. Con frecuencia se unen varios deslizamientos para conformar un flujo de gran magnitud.

Tipos de Flujos: Los flujos se clasifican de acuerdo con las características del material deslizado:

2.4.2.6.1 Flujos de Detritos y Flujos de Tierra

Son movimientos de velocidad variable entre rápidos o muy rápidos para los flujos de detritos y lentos, de carácter viscoso en los flujos de tierra. Estos flujos se forman de materiales provenientes de la meteorización de las rocas, que pierden su estabilidad estructural por efecto del agua, originando desplazamientos con formas alargadas, lobuladas en su extremo inferior; también se puede desarrollar a partir del cuerpo de otros tipos de deslizamientos, para formar movimientos complejos. En suelos residuales, es frecuente que se originen los flujos como falla de laderas en pequeños hundimientos sucesivos, o en series de movimientos traslacionales retrogresivos, dejando casi siempre en la corona una superficie cóncava típica. Los casos de flujos de detritos abundan en región de Colombia en forma de sección transversal oblicua de un reloj de arena desde planta, donde la parte superior está constituida por el deslizamiento de material meteorizado, seguido de un cuello angosto por el cual fluye el material, que en la base del talud se exhiba en la manera de abanico o cono (García, 1998).

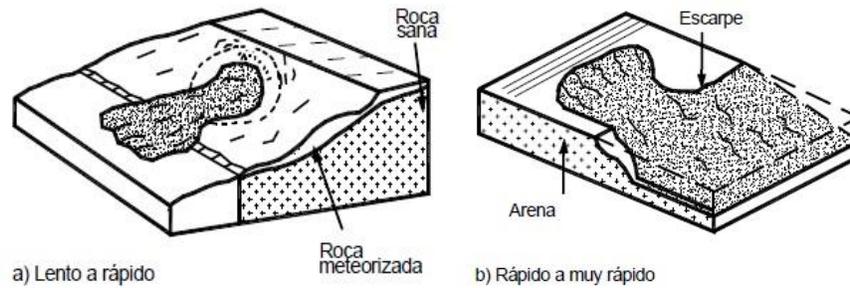


Figura 40. Flujo de acuerdo a su velocidad. Fuente: Suarez. J. (s. f.) Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico,

Con frecuencia estos conos sepultan alcantarillas y pontones, o desbordan muros de contención y se extienden sobre la calzada, o la atraviesan para crear problemas adicionales de arrastre de la banca, dejando el talud exterior en secciones a media ladera también con problemas de inestabilidad.

Existe una gradación completa desde deslizamientos de detritos hasta flujo de detritos dependiendo del contenido de humedad, movilidad y características del movimiento. También se puede presentar transición desde deslizamiento de detritos hasta avalancha de detritos, a medida que el movimiento se hace más rápido por disminución de la cohesión, aumento del contenido de humedad o incremento de la pendiente del talud.

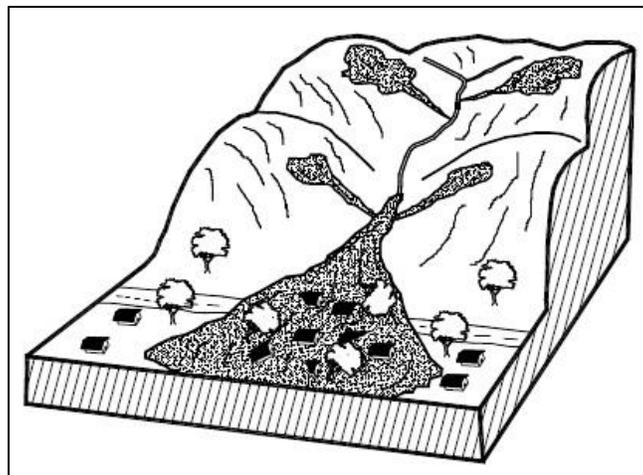


Figura 41. Flujo de detritos. Fuente: Suarez. J. (s. f.) Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico,

En suelos finos como limos, arcillas y arenas arcillosas también se logran causar flujos de tierra rápidos, puede también originarse una completa gradación con deslizamientos que incluyen la falla por propagación lateral y la licuación del material subyacente, además la falla retrogresiva y la licuación de la masa entera deslizada.

Los flujos de tierra algo más secos y lentos, de materiales con plasticidad media y alta, son comunes donde quiera que exista una combinación de factores como la presencia de arcillas o rocas arcillosas meteorizadas, taludes con pendiente moderada y humedad adecuada.

Aunque la palabra flujo indica presencia de agua, y algún contenido de esta es necesario para casi todos los tipos de movimiento en flujo, en ocasiones ocurren casi secos en material granular.

2.4.2.6.2 Flujos de lodos

Es común que se formen cuando una masa de detritos se ablanda por acción de la agua, hasta tener una consistencia blanda y fluida, poniéndose en movimiento y alcanzando velocidades altas, según la intensidad y duración de las lluvias como factor principal desestabilizante, y de la pendiente del terreno.

Estos flujos tienen forma de lengüeta e inclinación que varía entre 5 y 15 grados en la superficie de los cuerpos de acumulación. En zonas de pendientes altas, pueden alcanzar grandes velocidades y distancias, arrastrando e incorporando a su paso materiales sueltos de las paredes y fondo de cañadas. Se deduce que pueden adquirir enormes poderes destructivos y arrastrar o cubrir con lodo instalaciones que encuentre a su paso.

Algunos flujos de detritos y flujos de lodos presentan avances sucesivos, como en oleadas, los cuales pueden deberse al empuje repetido por movilización periódica de materiales en el área de alimentación o por el represamiento periódico y su posterior liberación en las partes bajas.

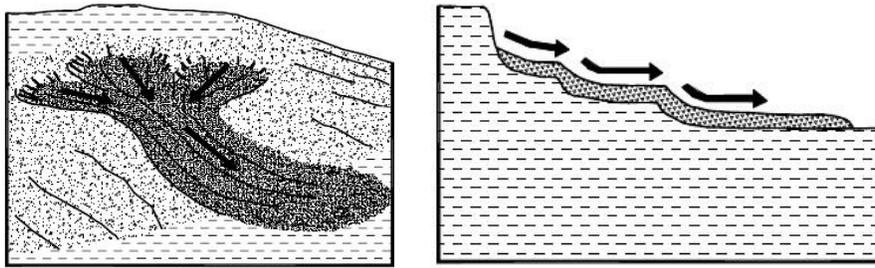


Figura 42. Flujo de lodos, formación y avance. Fuente: Suarez. J. (s. f.) Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico,

Es claro que la topografía tiene una gran influencia sobre el tamaño de la zona inundada y la longitud de los flujos de lodo. Para un volumen dado, los que fluyen encajonados en valles estrechos serán más gruesos y alcanzaran mayores distancias que aquellos que fluyen sobre valles amplios y abanicos. En la parte superior de los cerros, donde las pendientes son mayores, los efectos de los flujos de lodo son erosivos, pero en terrenos más planos la masa en movimiento pierde velocidad y comienza a depositar material, hasta quedar en reposo como una o varias capas de escombros que pueden alcanzar en conjunto varios metros de espesor. Manual de Estabilidad de Taludes, INVIAS, García. Manuel 1998.

Los flujos de lodos pueden ser generados de muchas maneras, entre las siguientes;

- Aguaceros torrenciales sobre depósitos de fragmentos no consolidados que existen en zonas montañosas.
- Colapso de presas formadas por flujos de lava, lahares⁵, movimientos en masa, acumulaciones de desechos etc.
- Incorporación de detritos en crecientes causadas por lluvias o por deshielo de glaciares o nieve.

2.4.2.6.3 Avalanchas

Consiste en un movimiento muy rápido de masa de materiales gruesos, tales como grandes bloques de roca, cascajo y arena, con ciertas cantidades de suelos más finos

⁵ Tipo especial de avalancha o flujo de detritos, generados por el deshielo rápido de áreas de nevados, con erupciones volcánicas

como limo y arcilla junto con agua y aire atrapado. Se le da el nombre de avalancha de detritos cuando dicha masa contiene una cantidad apreciable de este material, ejemplo más del 50% de materiales de tamaño superior al tamiz número 4.

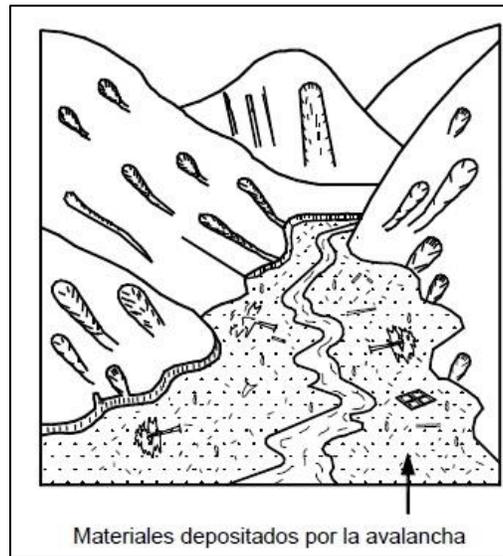


Figura 43. Poder de una avalancha, material depositado. Fuente: Suarez. J. (s. f.)
Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico,

El conjunto de materiales que compone una avalancha puede contener una parte más débil formada por terrones de arena, arcilla y limo, y por fragmentos de roca deleznable⁶, y una parte más resistente que la constituye los bloques de roca dura. Cuando se produce el derrumbe de la masa en el sitio de la fuente de esos materiales, y ocurre el desplazamiento siguiendo depresiones o cañadas del terreno, la parte más débil se desintegra o desmorona, sufre procesos de alteración o remoldeo y amasado que hacen aumentar el porcentaje de finos. Si a esto sumamos el aumento en el contenido de agua por aporte de la quebrada y laderas que desaguan hacia el cauce ocupado, el conjunto se torna más fluido, sumado los cambios de pendiente y el material arrastrado, las avalanchas se convierten en fenómenos altamente destructivos, con poder temible. (Guthrie & Cuervo , 1973).

⁶ Material fácilmente alterables, se disgrega o fractura con facilidad, y más aún al contacto con el agua.

2.4.2.7 Movimientos de Reptación

La reptación se manifiesta como un desplazamiento muy lento en la superficie del terreno, también se presenta en taludes de pendiente moderada y con cobertura vegetal. Estos movimientos presentan velocidades muy bajas, en promedio a 1 cm/año, en algunos periodos dependiendo de las lluvias, estos movimientos pueden ser nulos, o muy notorios, la señal más evidente de este tipo de movimiento es la deformación superficial del terreno, la formación de pliegues en formaciones rocosas o de escalones o arrugas en las masas de suelo, otras señales de este tipo de movimiento son; inclinación de árboles, cercas y postes, separación del suelo en el contacto con grandes rocas, la deformación a vías de comunicación y estructuras lineales, el tensionamiento de raíces de árboles (García, 1998).

En los movimientos reptaciones, no existe una separación definida entre el suelo que se está moviendo y el suelo que no, en zonas de laderas, estos movimientos pueden alcanzar grandes extensiones, las reptaciones no debe perderse de vista, ya que, a pesar de tener una tasa de movimiento lento, la deformación acumulada durante varios años es capaz de llevar la masa a su límite de resistencia y originar un deslizamiento.

Existen ocasiones en que una zona en reptación puede evolucionar a un flujo de tierras, si la acción del agua o de otros agentes lleva a la reducción de la resistencia del material o las cargas impuestas superan dicha resistencia. También es posible que masas que han sufrido deslizamientos en el pasado y reposen sobre terrenos de pendiente moderada, estén en reptación en la actualidad.

La profundidad del movimiento puede ser desde pocos centímetros hasta varios metros, se le atribuye a las alteraciones climáticas relacionadas con los procesos de humedecimiento y secado en los suelos, usualmente arcillosos, muy blandos o alterados, con características expansivas. Ya que los movimientos de reptación son muy lentos, la mejor forma de analizar un proceso de “creep”⁷ es mediante el monitoreo del mismo.

⁷ Deformación lenta de un material frente a esfuerzos, proceso de deformación u ocurrencia de movimiento reptacional.

2.4.2.8 Movimientos Complejos

Un movimiento complejo, son aquellos tipos de movimientos en los que ocurre una combinación de dos tipos básicos de movimientos o más, en las regiones colombianas, se consideran que los movimientos más comunes son; hundimiento-flujo de tierras, y la caída de rocas-avalancha de detritos.

Los hundimientos-flujos de tierra ocurren principalmente en deslizamientos de tipo rotacionales que adquieren un componente traslacional, en los cuales, la masa abarcada se deforma y disgrega por acción de la fricción entre los materiales, sumado a esto la acción del agua puede generarse flujo de lodos o de tierra.

La caída de rocas-avalanchas de detritos, pueden originarse del desprendimiento de laderas muy empinadas, donde series o grupos de lajas y bloques de roca caen. Los bloques pueden volcarse y caer por acción del agua y de sismos, desintegrándose en parte y arrastrando a su paso material alterado y vegetación, evolucionando a avalancha debido a su alta energía cinética y alta pendiente. En los botaderos de materiales sobrantes de excavaciones de ingeniería o de minería son muy comunes los casos de hundimientos y flujo de tierra y lodos. El problema de su estabilidad es complicado puesto que al movimiento se suman casi a diario volúmenes apreciables de material de desecho debido a la continua disposición de ellos en las actividades ingenieriles y mineras, sumándose a esto la pluviosidad y la pendiente se pueden generar movimientos rápidos y catastróficos ante la ocurrencia de un temblor o la más mínima falla de las estructuras de contención instaladas previamente (Suarez J. , 1998).

Capítulo III.

Descripción del Sitio de Estudio

El sitio de estudio se encuentra ubicado entre en el corregimiento de San Cristóbal, vereda Pajarito, consiste en un movimiento en masa tipo reptacional que se halla alterando la estabilidad de la banca la cual compone la vía que comunica la ciudad de Medellín con el municipio de San Pedro, así como ocasionando deformaciones en la superficie del terreno e imposibilitando el desarrollo urbano de la zona colindante.

3.1 Información general Vereda Pajarito y sitio de estudio

El sector de Pajarito está ubicado en el costado occidental de la ciudad, en la altar de Robledo, en cercanías del área urbana del Corregimiento San Cristóbal, en terrenos de lo que alguna vez se denominó genéricamente Cucaracho. Según relatos de la comunidad, toda esta ladera era asiento de casas de veraneo, a donde los habitantes de Medellín acudían en épocas de vacaciones a descansar y disfrutar del paisaje cuya panorámica domina buena parte del extremo sur del Valle de Aburrá. Lo que hoy distinguimos como el poblado de Pajarito, no es más que el producto del fraccionamiento y venta de algunas de las fincas que ocupaban ese territorio, de manera que las pequeñas parcelas se concentraron en un solo sitio, y permanecieron hasta el día de hoy rodeadas de fincas extensas, ocupadas por sus propietarios los fines de semana y en temporadas de vacaciones.

Mediante el Decreto 346 de 2000, que ajusta el inventario de comunas y barrios del Municipio de Medellín a lo contemplado en el Plan de Ordenamiento Territorial, el sector de Pajarito es parte del suelo de expansión. El suelo de Pajarito participa con el 45% aproximadamente del suelo de expansión disponible para Medellín (Departamento administrativo de planeación).

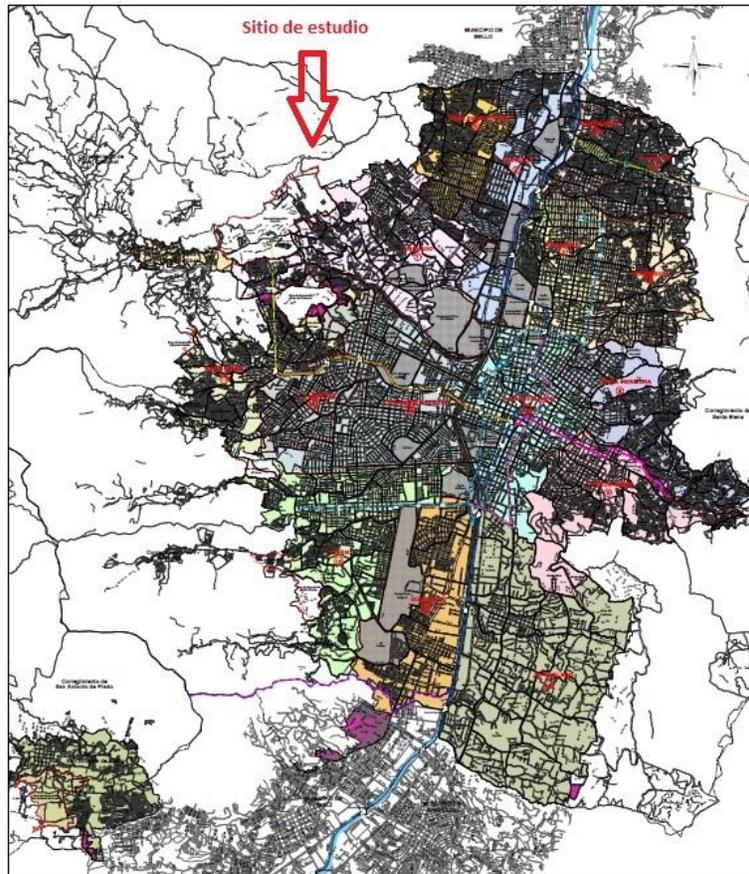


Figura 44. Ubicación del sitio de estudio, ciudad de Medellín. Fuente: Alcaldía de Medellín, (2016) *Consulta de planos, división administrativa y política*

La ciudad de Medellín, está colindando en la nor-occidente con el corregimiento de San Cristóbal, dicho corregimiento se constituye de 8 veredas, el sitio del estudio se localiza en la vereda Pajarito, al límite con la ciudad de Medellín.

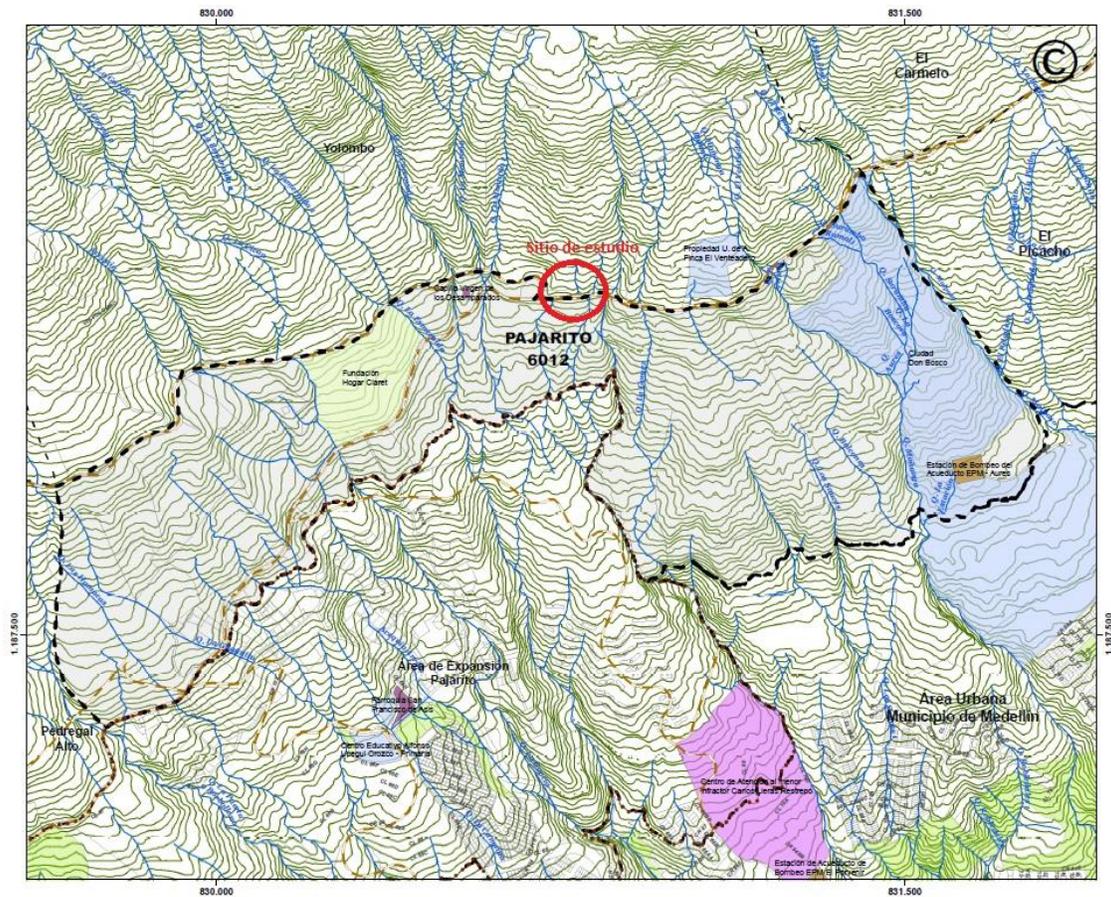


Figura 45. Sitio de estudio en vereda Pajarito. Fuente: Alcaldía de Medellín, (2016)
Consulta de planos, división administrativa y política

Los límites de referencia del sitio de estudio con la ciudad de Medellín son; comuna noroccidental de la ciudad de Medellín, limitada al norte por la quebrada La Madera, que a su vez separa los municipios de Medellín y Bello. Al oriente limita con el río Medellín hasta la calle 93, cruzando en diagonal hasta aproximadamente la calle 89 con la carrera 65 (E = 834 629 m, N = 1 186 578 m), y siguiendo hasta la calle 80 con carrera 67 (E= 834 327 m, N = 1 186 278 m), sin incluir el Cementerio Universal. Continúa por la carrera 67 hasta la transversal 78. Al sur, parte de la transversal 78 con la transversal 73 (E = 833 770 m, N = 1 185 692 m), sigue hacia la calle 65 hasta el cruce con la carrera 80 y se extiende por la quebrada La Iguaná.

Comprende el sector del Doce de Octubre con los barrios Santander, Doce de Octubre No. 1 y No. 2, Pedregal, Los Arrayanes, El Triunfo, El Progreso No. 2, Mirador del Doce, Kennedy, San Martín de Porres, La Esperanza. Igualmente, incluye el sector de Castilla con los barrios Florencia, Tájelo, Las Brisas, Toscana, Boyacá, Héctor Abad Gómez, Plaza de Ferias, Girardot, Belalcázar, Tricentenario, Castilla, Francisco Antonio Zea, Alfonso López, parte de El Progreso y El Oleoducto. Se encuentra además en esta zona homogénea el sector de Robledo con los barrios Córdoba, Luis López de Mesa, Bosques de San Pablo, Pilarica, Facultad de Minas, Altamira, Bello Horizonte, El Diamante, Aures No. 1 y No. 2, Picachito, Picacho, Palenque No. 1 y No. 2, Villa Flora, La Pola, El Cucaracho, Robledo, Porvenir, Fuente Clara y Santa Margarita.

Los terrenos de esta zona están constituidos básicamente por una serie de depósitos del tipo coluvial, predominantemente flujos de lodos y/o escombros. Adicionalmente, presenta afloramientos locales de anfibolita y neis. El relieve de esta parte del flanco del valle está caracterizado por una morfología desde irregular a ondulada, con una pendiente suave en su parte inferior cercana al río Medellín. A medida que se asciende sobre la ladera, la morfología se torna moderada, rasgo que se conserva hasta llegar a la parte alta media del flanco del valle, a la altura de la vía que conduce de Medellín a San Pedro.

3.2 Hidro-geografía del sitio de estudio

Por las características geomorfológicas de la zona, las aguas confluyen hacia la depresión geológica que conforma el Valle de Aburra, las pendientes medias a altas de los cerros y taludes en las zonas laterales al Valle, han generado afluentes y condiciones hidrográficas particulares.

Geográficamente, la zona es una franja irregular y alargada en sentido W-E. Topográficamente comprende cotas que van desde los 1700 y 1800 m.s.n.m. (perímetro urbano) hasta los 2010 m.s.n.m. presentándose una ladera de pendientes largas.

El drenaje de la zona en términos generales es denso entre la cuenca de la quebrada El Hato al Occidente y la quebrada La Gómez al Oriente. Varias de las corrientes de agua

que drenan la zona han moldeado cañones profundos, con alta probabilidad de ocurrencia de crecientes torrenciales y la presencia de procesos erosivos activos de gran magnitud. (Quebrada La Puerta y la Corcovada).

Las principales quebradas que drenan esta zona son: El Hato, La Chaguala, La Cascua, El Chagualón o La Merced, La Cascada, Los Chorros, La Colonia o Puerta, La García, La Corcovada y La Gómez.

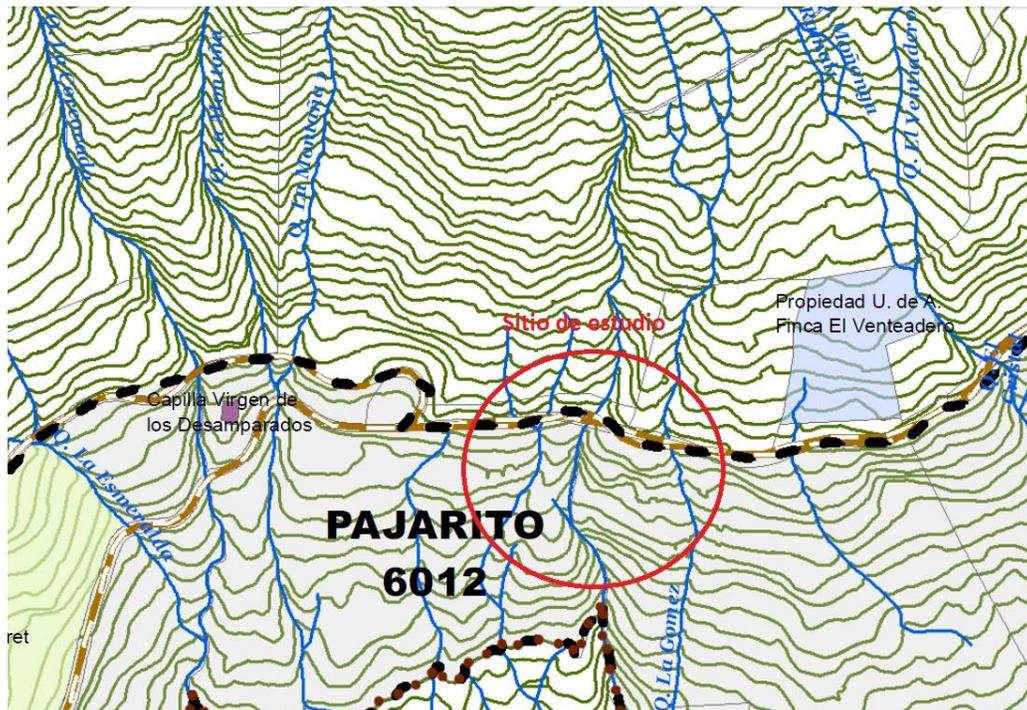


Figura 46. Ubicación de quebradas en la zona de estudio. Fuente: Cartografía SIGAME 1998, POT (Acuerdo 046 de 2006), Dpto. Administrativo de Planeación, Unidad de Servicios Públicos, Medio Ambiente y Geología. Estudio de las Coberturas del Suelo 2006

En términos más puntuales, muy cercano al sitio de estudio existen las quebradas; La Montaña, La Esmeralda, La Corcovada, y en especial la quebrada La Gómez, la cual está pasando muy cerca al flanco derecho del deslizamiento, estos afluentes generan pendientes locales mayores a 60%, las cuales contribuyen con la inestabilidad de algunas zonas.

3.3 Geomorfología sitio de estudio.

La zona de Pajarito está constituida en casi toda su totalidad por depósitos coluviales, depósitos de flujos de escombros y lodos maduros, y por suelos residuales de anfibolita; se caracteriza por presentar pendientes pronunciadas. En las cercanías y en especial en las zonas paralelas a la vía al mar, el relieve pasa a configurarse en una topografía escalonada, como resultado de los movimientos de masa y de la fuerte incisión de las principales quebradas.

3.4 Información de depósito de suelos en sitio de estudio.

En el sitio de estudio, y tomando información existente del PLAN PARCIAL DE DESARROLLO EN SUELO DE EXPANSIÓN – PAJARITO – Desarrollado por el municipio de Medellín en el año 2012, este documento que recopila información de aspectos sociales, económico, pero también información de suelos como; geografía, geología, geomorfología, hidrología y otros aspectos importantes de la vereda Pajarito.

A continuación se describen el tipo de depósito existente en el sitio de estudio, los cuales coinciden con los suelos descritos en el estudio de Instrumentación y microzonificación sísmica del área urbana de Medellín (Alcaldía de Medellín).

En el sitio de estudio se observan los siguientes depósitos de suelos; Depósitos Coluviales (Qc): Material superficial constituido por una matriz limo-arcillosa clara y tonalidades oscuras debido a la presencia abundante de suelo orgánico. Se encuentran localizados a media ladera, entre la vía que comunica a Medellín y San Pedro y sobre la vertiente izquierda de la quebrada La Iguaná (Pedregal Bajo, márgenes de la quebrada La Puerta, Finca El Tirol, La Gómez, costado W de las Hamacas, parte alta finca La Montaña, La Aurora y Pajarito, y en el cañón de la quebrada La Corcovada), interrumpidos localmente por los flujos de escombros y lodos. El espesor de estos depósitos varían entre 1.0 y 30 metros, y presentan una morfología irregular, aborregada (casco de vaca) y escalonada.

3.5 Procesos Morfo dinámicos.

Tomando información existente del DOCUMENTO TÉCNICO DE SOPORTE PLAN PARCIAL PAJARITO POLIGONO Z2_DE_4, 2012, a continuación se presenta una descripción resumida de los procesos evidenciados en la Vereda Pajarito, y los procesos que ocurren en la zona de influencia al estudio.

En la zona de expansión de Pajarito los procesos erosivos existentes tienen estrecha relación con las formaciones superficiales, los perfiles de meteorización, las características geomorfológicas, el clima, la vegetación, los usos del suelo y la acción antrópica. La cartografía de los procesos erosivos es una variable de bastante peso para determinar la aptitud del suelo para el uso urbano.

En esta franja de terreno los procesos morfo dinámicos actúan de una manera más intensa en los cañones de las quebradas La Gómez, La Corcovada, La Puerta, El Chagualón y La Chaguala y en los taludes aledaños a la vía al Mar entre las quebradas La Puerta y El Hato, generando el transporte de una cantidad importante de sedimentos y bloques de roca, por las corrientes de agua que la drenan y por la vía al Mar.

En la zona se presentan: socavación de márgenes, incisión de cauces, hundimientos, deslizamientos, reptación, escarpes erosivos, erosión por sobrepastoreo, etc.

3.5.1 Proceso de inestabilidad en sitio de estudio tomando información externa.

Tomando información existente del DOCUMENTO TECNICO DE SOPORTE PLAN PARCIAL PAJARITO POLIGONO Z2_DE_4, 2012, a continuación se presenta la

ubicación de los movimientos de reptación en la zona de Pajarito, **Reptación**; Proceso que se manifiesta en varios sectores del área de estudio, especialmente en la parte inferior y superior de la escuela y cancha de fútbol del barrio Pedregal Bajo, en la parte baja o Sur de las fincas La Aurora y Tierra Grata, en el límite Sur - Este de la finca El Tirol, y en la vertiente derecha (límite SE) de la quebrada La Gómez, afectando en su mayoría depósitos coluviales. Este sitio coincide con la ubicación del sitio del estudio, y re confirma la presencia de un movimiento tipo reptacional ocasionado por la acción del agua sobre depósitos coluviales.

3.6 Información de sitio de estudio empleando sistemas de información.

Con información recopilada del servicio virtual del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, en su aplicativo; Mapa Levantamiento de Suelos, en donde se tiene un perfil de suelo previamente cargado a la información; perfil de suelos A356, a continuación se presenta esta información:

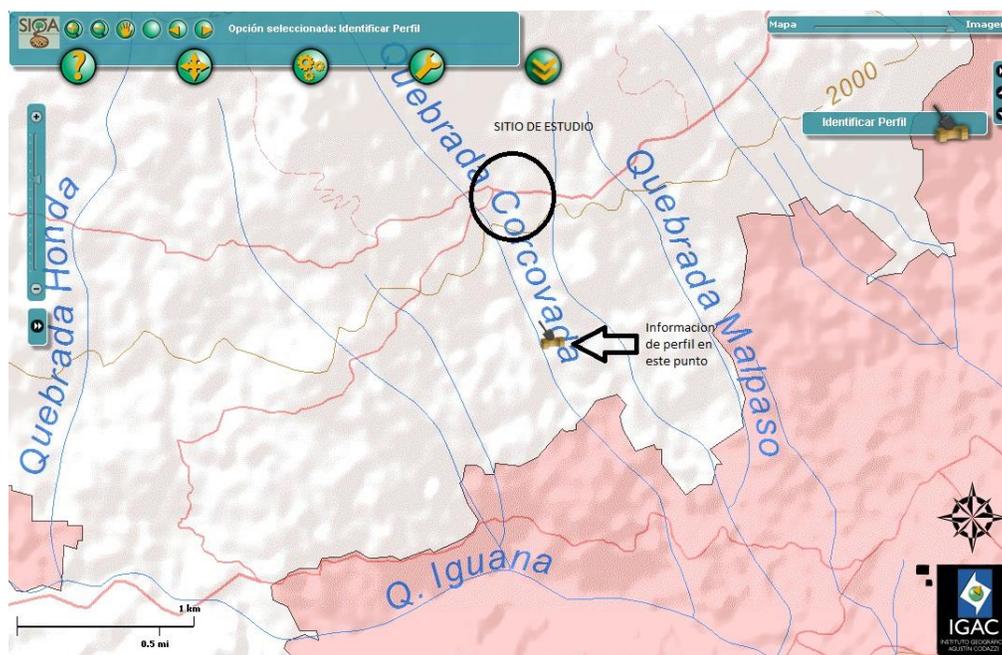


Figura 47. Mapa ubicación de sitio de estudio e información de perfil existente. Fuente: instituto Geográfico Agustín Codazzi, (Junio 2016), *Levantamiento de suelos* Recuperado

de:

<http://www.igac.gov.co:10040/wps/portal/igac/raiz/iniciohome/MapasdeColombia/Aplicaciones/LevantamientoDeSuelos>.

La información del perfil se toma del punto denominado por el IGAC⁸ como A356, ubicado a 1 km hacia el Sur del sitio de estudio, el perfil mostrado a continuación es:

Depósitos de suelos residuales y depósitos coluviales, suelos finos plásticos potencialmente susceptibles a deslizamientos por condiciones locales de humedad en el área y pendientes de la zona.

También tomando información del sistema de información de movimiento en masa (SIMA) recientemente puesto en marcha por el Servicio Geológico Colombiano, a continuación se presenta la ubicación de deslizamientos cercanos al sitio de estudio, los cuales han sido inventariados por el SGC⁹, y son una evidencia de la inestabilidad del área:



Figura 48. Inventario de deslizamientos cercanos al sitio del estudio. Fuente: Servicio Geológico Colombiano (Junio 2016) Recuperado de: <http://simma.sgc.gov.co/#/public/>

⁸ Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

⁹ Servicio Geológico Colombiano

Empleando esta plataforma, también es posible conocer la zonificación de amenaza geotécnica relacionada a deslizamientos y movimientos de masa, empleando el SIMMA, a continuación se presenta esta zonificación, donde el sitio de estudio se clasifica como sitio de amenaza geotécnica alta.

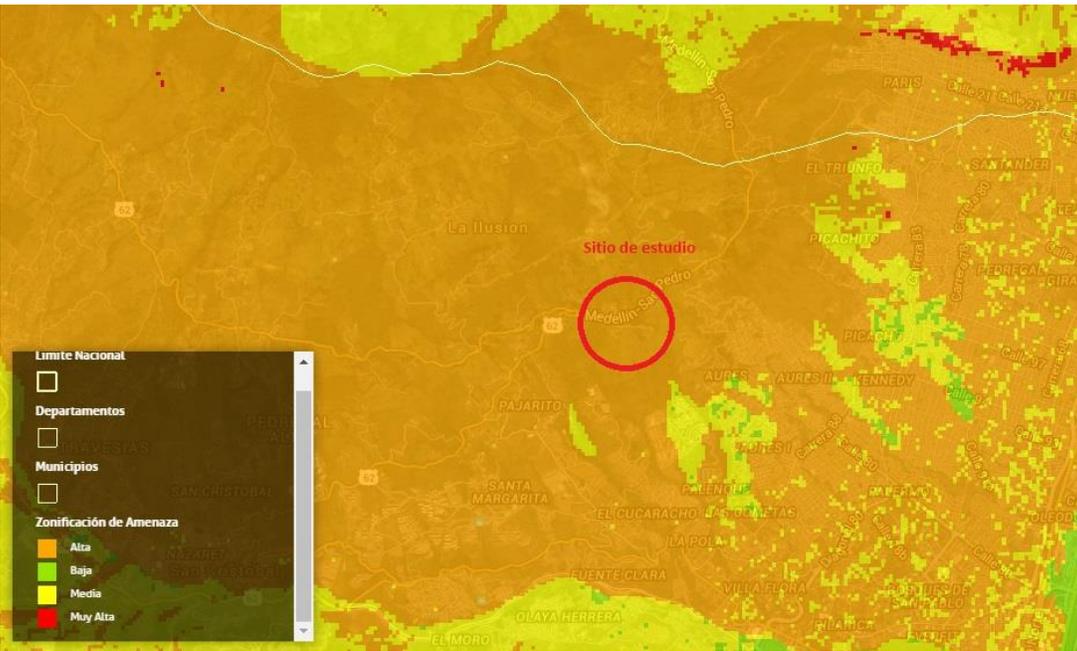
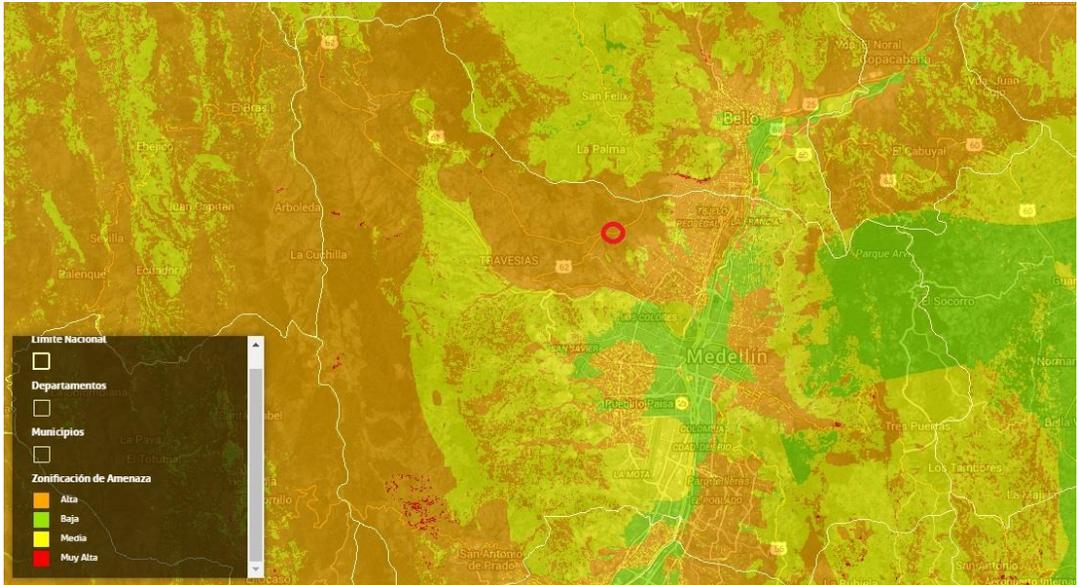


Figura 49. Zonificación de amenaza geotécnica, SIMMA. Fuente: Servicio Geológico Colombiano (Junio 2016), IMMA; Recuperado de: <http://simma.sgc.gov.co/#/public>

A continuación se muestra la clasificación de zonificación de susceptibilidad a la ocurrencia de un deslizamiento o evento geotécnico, empleando el sistema de información SIMMA, donde se observa en color rojo las zonas con susceptibilidad a la ocurrencia de un deslizamiento, es curioso que en el sitio del estudio solo se observen pequeños puntos rojos, cuando es evidente la existencia de una masa inestable, y de varias masas inestables en la zona.

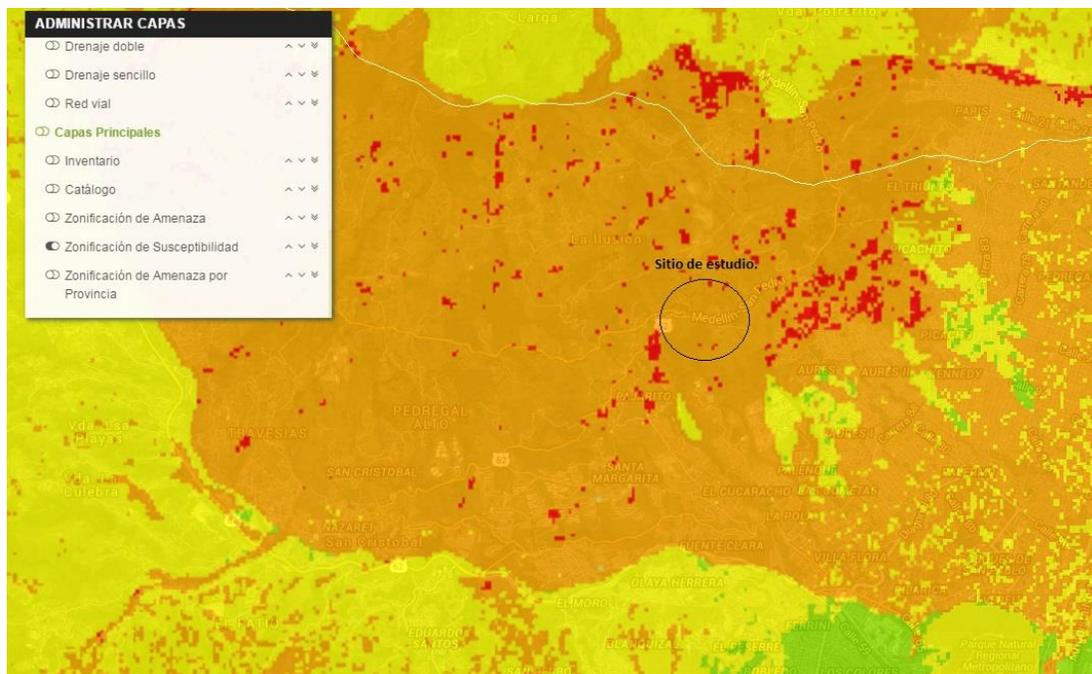


Figura 50. Zonificación de susceptibilidad de amenaza geotécnica, SIMMA. Fuente: Servicio Geológico Colombiano, IMMA; (Junio 2016) Recuperado de: <http://simma.sgc.gov.co/#/public/>

Finalmente también es posible conocer las unidades geomorfológicas presentes en el sitio de estudio empleando la plataforma SIMMA, a continuación se presenta esta unidad geomorfológica:



Figura 51. Unidad geomorfológica existente. Fuente: Servicio Geológico Colombiano, IMMA; (Junio 2016.) Recuperado de: <http://simma.sgc.gov.co/#/public/>

El sitio de estudio está compuesto principalmente por un Cono y lóbulo coluvial y de soliflucción¹⁰, estos materiales pueden presentar desplazamiento masivo y lento por gravedad, generalmente los materiales corresponden a formaciones arcillosas, los cuales varían sus estados de consistencia con los cambios de humedad, donde se observan materiales blandos sobrepuestos de materiales con presencia de rocas (coluviones).

Concluyentemente el tipo de suelos presente en el sitio de estudio es un suelo tipo coluvión, de matriz arcillosa y limosa, el cual se encuentra susceptible a los cambios de humedad y temperatura, estos suelos son producto de procesos residuales debido a las condiciones topográficas e hidrográficas, así como también a las condiciones geológicas de la zona, en campo se observaron materiales relacionados a esta descripción, lo que concuerda con las descripciones del depósito de suelos dadas en; Estudio de Instrumentación y microzonificación sísmica del área urbana de Medellín Alcaldía de Medellín. SIMPAD-Universidad EAFIT-Integra- Ingeominas- Universidad Nacional, PLAN PARCIAL DE DESARROLLO EN SUELO DE EXPANSIÓN – PAJARITO – Desarrollado por el municipio de Medellín en el año 2012, y el Servicio Geológico Colombiano IMMA.

¹⁰ Depósitos de suelos que se encuentran susceptibles a desplazamientos lentos por los cambios de humedad y temperatura de la zona.

3.7 Señales de Inestabilidad

Este sitio ha sido objeto de reparaciones constante por parte de entes gubernamentales, pero es evidente que el problema de inestabilidad continúa.

Por las señales evidentes de la existencia de inestabilidad, información recopilada de testigos y persona, y registros fotográficos del sitio, es claro que está ocurriendo un movimiento en masa. Tras visitas realizadas al sitio en el mes de Noviembre del año 2015 y hasta Junio del año 2016, se observó que: El sitio presenta una topografía irregular, con pendiente pronunciada hacia el Sur, son evidentes las deformaciones en la superficie del terreno, la presencia de escarpes, inclinación de vegetación y cercas, así como la presencia de agua.



Figura 52. Sitio de estudio antes de intervención, anterior a Diciembre de 2015. Fuente: Google Earth. 2015.

Adicional a esto, se conoce que este sitio fue recientemente intervenido (Diciembre 2015), donde se trató de recuperar el nivel de la rasante de la vía, tras ser afectada considerablemente por el movimiento en masa, esta reparación aun es visible en el asfalto nuevo recientemente aplicado, así como nueva demarcación y reconstrucción de

las bermas del pavimento y en el hundimiento de la estructura del terraplén, el cual se puede observar desde poca distancia, como también el volcamiento de algunos muros de contención tipo gaviones en el costado Norte los cuales no fueron reparados o remplazados.



Figura 53. Visita a sitio de estudio, Febrero de 2016. Fuente: Propia.

Acorde con la información recopilada en campo, y tomando como base información existente, se establece que en el sitio de estudio está ocurriendo un movimiento de tipo reptación, el cual se manifiesta como un desplazamiento muy lento en la superficie del terreno, el talud presenta una pendiente moderada con cobertura vegetal, las señales antes descritas dan una idea de la baja velocidad del movimiento; la señal más evidente de este tipo de movimiento es la deformación superficial del terreno, la formación de pliegues o arrugas en las masas de suelo, otras señales de este tipo de movimiento son; inclinación de árboles, cercas y postes, la deformación a vías de comunicación y estructuras lineales, el tensionamiento de raíces de árboles.

3.7.1 Hundimiento de sub rasante

La señal más clara en este sitio es el hundimiento de la sub rasante, con una altura diferencial de aproximadamente 1,50 metros, la dirección del hundimiento indica la dirección del deslizamiento, la baja velocidad aparente del deslizamiento permitió la reconstrucción de la calzada en el mes de diciembre como medida para no intervenir el tráfico.



Figura 54. Hundimiento de sub rasante sitio de estudio. Fuente: Propia.

3.7.2 Estructuras Existentes

Se pudo confirmar en algunas estructuras, señales de la presencia de un deslizamiento; muros de gaviones colapsados, inclinación en cercas de cerramiento, disipadores averiados.



Colapso de muros de contención



Inclinación de cercas de cerramiento



Daños en disipadores



Daños en disipadores

Figura 55. Estructuras existentes en sitio de estudio. Fuente: Propia.

La vegetación también indica la presencia y dirección de un deslizamiento, los arboles cuyos troncos están inclinados en la base pero recobran su verticalidad a un metro sobre el suelo (en forma de J) indican un movimiento tipo reptacional, que afecta a solo arboles de pequeños diámetros, arboles con troncos rectos pero inclinados en distintas direcciones dentro de un área, indican movimientos recientes. Arboles con troncos curvados por completo (en forma de C) se encuentran en taludes con un largo historial de movimiento continuo y lento. En el sitio de estudio se observa que la vegetación como los arboles indican la presencia de un deslizamiento, la forma y dirección de sus troncos dan una idea de la baja velocidad y lo reciente de los movimientos (García, 1998).



Inclinación se tronco



Inclinación de árbol



Inclinación de arboles



Tronco en forma de J

Figura 56. Inclinación de vegetación como señal de deslizamiento. Fuente: Propia.

3.7.3 Escarpes

Los escarpes que se observan en el sitio de estudio indican de la existencia de un deslizamiento, estos escarpes permiten tener una idea de las dimensiones del mismo, así como sus flancos¹¹, estos escarpes sin fácilmente identificables, permiten tener una idea del espesor de la cobertura vegetal y tipo de suelo superficial.

¹¹ Extremos del deslizamiento, extensiones máximas en sentido horizontal y vertical de un deslizamiento, zona límite de la afectación del movimiento.



Figura 57. Escarpes superiores observados en el sitio de estudio. Fuente: Propia.

Los escarpes son observables en la parte superior de la vía (costado norte), indicando posiblemente la corona del deslizamiento, estos escarpes se pueden observar desde la calzada.

A medida que se realiza un recorrido por toda la zona, se observaron más escarpes en diferentes lugares del deslizamiento, algunos más evidentes o pronunciados que otros, un factor que permitió identificar los escarpes es la baja vegetación, causada por la deforestación con fines ganaderos.

Los escarpes permiten la infiltración del agua, estos aceleran los deslizamientos ablandando el material y disminuyendo las propiedades de resistencia, también pueden ser un indicativo para determinar el tipo de deslizamiento presente.



Figura 58. Escarpe inferior observado en el sitio de estudio. Fuente: Propia.

Otros escarpes que se observaron se ubican en los costados Este y Oeste del deslizamiento, dando una clara idea de la ubicación de los flancos y la magnitud del deslizamiento.



Escarpe costado Occidental



Acercamiento a escarpe costado Occidental



Escarpe costado Oriental



Acercamiento a escarpe costado Oriental

Figura 59. Escarpes costados Este y Oeste observados en el sitio del estudio. Fuente: Propia

3.7.4 Deformaciones superficiales

Las deformaciones superficiales son señales claras de la existencia de un deslizamiento, en el sitio de estudio estas señales fueron fácilmente observables e identificables debido a la poca vegetación, las deformaciones superficiales se hacen más notorias a medida que el deslizamiento toma mayor velocidad y magnitud.

A continuación se presentan tres fotografías panorámicas tomadas del deslizamiento, en estas fotografías se puede observar la deformación superficial en la topografía del deslizamiento.



Figura 60. Panorámica del deslizamiento desde la parte alta hacia el sur (parte baja).

Fuente: Propia.

En la derecha de la fotografía, se observa el escarpe en el Occidente, siguiendo la línea del dissipador en concreto, también se observa la irregularidad del terreno, la inclinación de los árboles y los cambios abruptos en la topografía.

La segunda fotografía es tomada desde un punto medio del deslizamiento hacia la calzada (fotografía de sur a norte). La calzada está ubicada por debajo de los cables de redes públicas que se observan en la parte superior de la fotografía, a la izquierda se observa un escarpe.



Figura 61. Panorámica del deslizamiento desde un punto medio hacia el norte (parte alta).

Fuente: Propia.

Y la tercera fotografía es tomada desde un punto medio hacia la parte baja del deslizamiento (hacia el sur).



Figura 62. Panorámica del deslizamiento desde un punto medio hacia el sur (parte baja).

Fuente: Propia.

En esta fotografía se observa la irregularidad de la superficie del deslizamiento, en el costado izquierdo abultamientos de material.

3.7.5 Nacimientos de agua

A pesar de que estas fotografías se tomaron en el mes de Enero, cuando Colombia estaba atravesando por el fenómeno de El Niño, se observó la presencia de agua en

algunas áreas del deslizamientos, también se observaron algunos drenes sub horizontales, los cuales fueron instalados con anterioridad como parte de los trabajos de remediación o mitigación de la desestabilidad por entes gubernamentales.

Se conoce que el agua es una de los principales factores disparadores de la inestabilidad, consultando testigos del deslizamiento (viviente de la finca y viviente de finca vecina) estos argumentan que en épocas lluviosas se observa una cantidad inusual de agua que nace de varios sitios del deslizamiento. Durante la primera visita de campo, se detectaron zonas blandas, indicativos de humedad constante, estas se localizan en la parte media y baja del deslizamiento.



Figura 63. Presencia de agua en dissipador. Fuente: Propia.

En la fotografía anterior, se observa agua en el dissipador, el flujo de esta agua es constante, la pendiente de la estructura y del terreno conduce las aguas hacia la parte baja del deslizamiento.



Figura 64. Zona blanda en el sitio de estudio. Fuente: Propia.

En todo el centro de la fotografía anterior, junto al tronco de árbol inclinado, se encuentra una zona blanda debido a la constante humedad en el material. Esta zona se encuentra constantemente húmeda incluso en periodos secos, es un claro indicativo de humedad en los materiales sub superficiales que componen el deslizamiento.

Capítulo IV

Caracterización del deslizamiento

Una vez determinado el tipo de deslizamiento que está ocurriendo en el sitio, se presentan las características del mismo, como lo son; dimensionamiento, volumen, actividad, velocidad y clasificación según su tamaño. Todas estas propiedades cuantitativas y cualitativas, dan una completa información del fenómeno, y son la base para su investigación, monitoreo y posterior evaluación de estabilidad y riesgo.

4.1 Dimensiones del Movimiento

Tras conocer las partes de un deslizamiento, es necesario obtener las dimensiones del mismo, con el objetivo de determinar las demás propiedades, el siguiente dimensionamiento se presenta teniendo en cuenta las recomendaciones de la Comisión de Deslizamientos de la International Association of Engineering Geology (IAEG 1990), donde se establece la nomenclatura para los deslizamientos, actualmente empleada por varios organismos de control y prevención de fenómenos naturales.

A partir de estas dimensiones es posible estimar el volumen del deslizamiento, lo cual resulta útil durante los trabajos de remediales. En muchos deslizamientos rotacionales la superficie de falla puede ser aproximada a una elipse.

Igualmente, y siempre y cuando sea esto posible, se deben medir alturas del nivel freático, alturas de los escarpes, radios de rotación del movimiento, pendientes de la superficie antes y después de la falla. En los deslizamientos la escala horizontal debe ser igual a la vertical. Se recomienda que las dimensiones sean identificadas en planos en planta y perfil del deslizamiento, o tomadas en campo por un profesional entrenado.

A continuación se presenta la nomenclatura asignada a las partes del deslizamiento (Suarez J. , Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico):

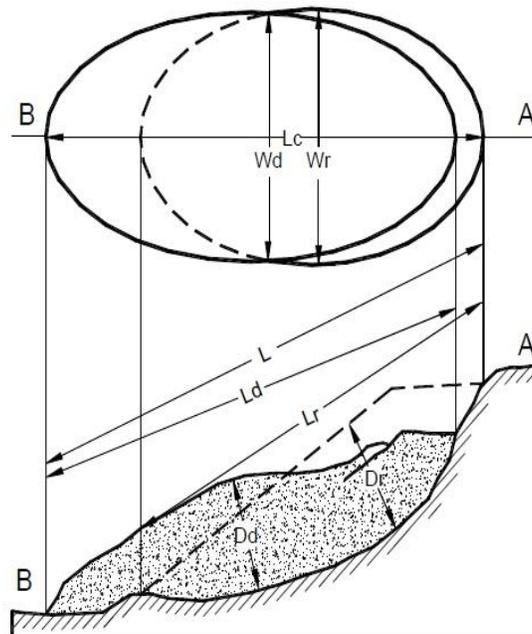


Figura 65 Dimensiones de un deslizamiento Fuente: Suarez. J. (s. f.) Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico,

Longitud de la masa desplazada L_d : Distancia mínima entre la punta y la cabeza.

Ancho de la masa desplazada W_d : Ancho máximo de la masa desplazada, perpendicular a la longitud L_d .

Ancho de la superficie de falla W_r : Ancho máximo entre los flancos del deslizamiento perpendicular a la longitud L_r .

Longitud de la superficie de falla L_r : Distancia mínima desde el pie de la superficie de falla y la corona.

Profundidad de la masa desplazada D_d : Máxima profundidad de la masa movida perpendicular al plano conformado por W_d y L_d .

Profundidad de la superficie de falla Dr: Máxima profundidad de la superficie de falla con respecto a la superficie original del terreno, medida perpendicularmente al plano conformado por W_r y L_r .

Longitud total L: Distancia mínima desde la punta a la corona del deslizamiento.

Longitud de la línea central L_c . Distancia que hay desde la punta (o uña) hasta la corona del deslizamiento, a lo largo de los puntos ubicados sobre la superficie original y equidistantes de los bordes laterales o flancos.

Las dimensiones del deslizamiento reptacional, son tomadas en campo realizando un levantamiento visual, y posteriormente empleando el equipo LiDAR, tras el primer levantamiento. A continuación se presentan las medidas del deslizamiento:



Figura 66. Medidas del deslizamiento Fuente: Elaboración Propia.

Tomando imágenes del escaneo ya vinculadas entre sí se puede observar un perfil topográfico del sitio del estudio, sobre este se han asignado medidas.

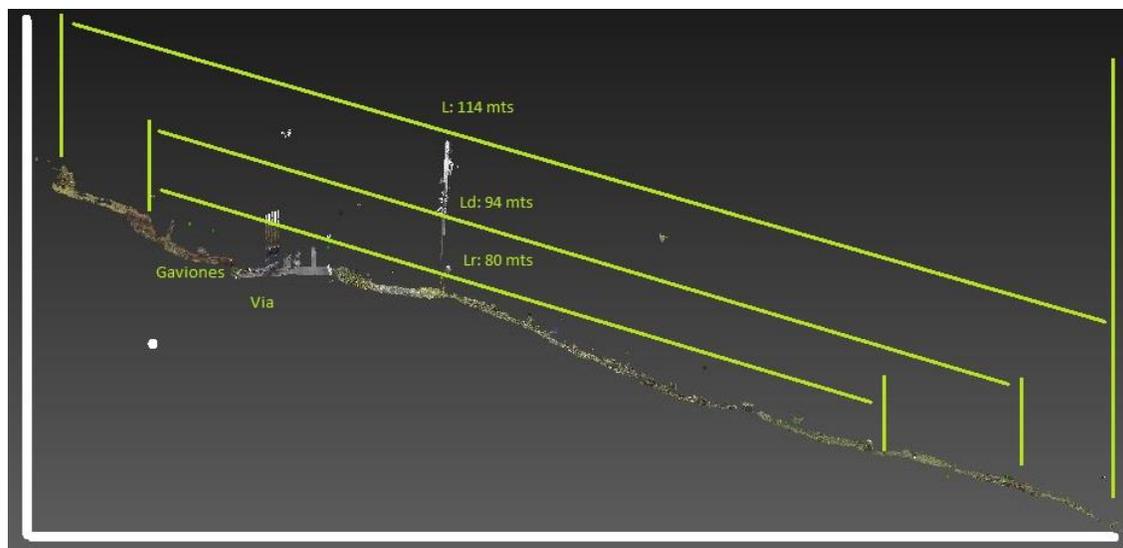


Figura 67. Medidas sobre puestas en perfil resultante del escaneo. Fuente: Elaboración Propia.

Longitud de la masa deslizada Ld: 94 metros, tomados desde los gaviones en el costado norte de la carretera existente, y hasta la parte baja del deslizamiento objeto del estudio.

Ancho de la masa desplazada Wd: 40 metros.

Ancho de la superficie de falla Wr: 53 metros, tomados desde el flanco occidental y hasta el flanco oriental.

Longitud de la superficie de falla Lr: 80 metros.

Profundidad de la masa desplazada D_d y Profundidad de la superficie de falla D_r :

Tomando como referencia la metodología MTN (Shuk Erdos, 1999) la cual se basa en dos informaciones importante para determinar parámetros de estabilidad de taludes; planos topográficos (tomados con el LiDAR) e información geología (citada en el capítulo I, III), información geomorfológica, estudios existes, y base de datos, sumado a esto la información recopilada en visita de campos y realizando observación al material, se puedo llegar a una aproximación en la profundidad de la masa desplazada.

El tipo de suelo predominante en el sitio de estudio es un suelo tipo coluvión de matriz limo-arcillosa, el cual se encuentra susceptible a los cambios de humedad y temperatura, estos suelos son producto de procesos residuales debido a las condiciones topográficas e hidrográficas, así como también a las condiciones geológicas de la zona, en campo se observaron materiales limo-arcillosos de colores cafés claros y cafés amarillentos, y algunos bloques de roca correspondiente a depósito de coluviones, los espesores del material oscila entre los 15 y 30 metros, su resistencia incrementa con la profundidad. Las posibles profundidades de contacto (D_r) entre los materiales están entre los 15 y los 30 metros, la velocidad del movimiento presente es acelerada por la presencia de agua en épocas de lluvia.

Longitud total L: 114 metros.

4.2 Volumen del deslizamiento

A partir de las dimensiones de cada deslizamiento, es posible estimar el volumen del deslizamiento, lo cual resulta muy útil para realizar los trabajos de remediación, y diseño de estructuras de contención.

El volumen del deslizamiento se mide en metros cúbicos después de la falla. El volumen aproximado de un desplazamiento puede calcularse utilizando la expresión:

Fórmula 1. Cálculo del volumen del deslizamiento.

$$Vol = \left(\frac{1}{6} \pi Dr * Wr * Lr \right) F \text{ expansión}$$

Fuente: Manual de Estabilidad de Taludes, INVIAS, García. Manuel 1998

Donde el valor del F expansión, corresponde al factor de expansión del suelo al ser alterado. El término “Factor de expansión” puede ser utilizado para describir este aumento en volumen, como un porcentaje del volumen antes del movimiento. El volumen del deslizamiento es importante para determinar la amenaza y el riesgo en los flujos y avalanchas. De acuerdo con el volumen y la concentración de sedimentos se puede determinar la velocidad del flujo.

Tabla 7. Volúmenes de deslizamientos con diferentes profundidades de falla.

Dr	Wr	Lr	F expansión	Volumen m3
15	53	80	1,15	38.296
16	53	80	1,15	40.849
17	53	80	1,15	43.402
18	53	80	1,15	45.955
19	53	80	1,15	48.508
20	53	80	1,15	51.061
21	53	80	1,15	53.614
22	53	80	1,15	56.167
23	53	80	1,15	58.721
24	53	80	1,15	61.274
25	53	80	1,15	63.827
26	53	80	1,15	66.380
27	53	80	1,15	68.933
28	53	80	1,15	71.486
29	53	80	1,15	74.039
30	53	80	1,15	76.592

Fuente: Elaboración Propia.

Tomando un factor de expansión del 15%, valor correspondiente a depósitos con contenido de material granular y tamaños superiores al tamiz 2" (Manual de Estabilidad de Taludes, INVIAS, Garcia. Manuel 1998).

4.3 Angulo del desplazamiento

El ángulo de desplazamiento del sitio del estudio fue tomado empleando como referencia las obras de manejo de aguas presente, este ángulo fue medido desde la parte baja del deslizamiento (parte sur) hacia la parte alta (norte), tal como lo indica la figura 25, la superficie del deslizamiento y su dimensión hizo de esta medida una tarea no muy fácil, se tomaron 4 ángulos observables desde diferentes puntos bajos y se promedió este valor, el ángulo alpha (α) del sitio de estudio es: 28°.

4.4 Angulo y longitud del recorrido

El ángulo de desplazamiento inicial determina las condiciones al inicio del movimiento y el ángulo de recorrido afecta el proceso del flujo hasta que se detiene o alcanza su longitud total de recorrido.

Para el deslizamiento de tipo reptacional, no se presentan longitudes de recorrido y ángulos de recorrido, pese a que es evidente un desplazamiento, este presenta una velocidad muy baja y el recorrido es de tipo cabalgamiento de material sobre material.

4.5 Método para describir la actividad de un deslizamiento

Los términos relativos a la edad y estado de actividad junto con las de las secuencias o repeticiones del movimiento han sido re agrupados bajo tres denominaciones:

4.5.1 Estado de Actividad

Describe lo que se sabe acerca del movimiento en función del tiempo, el estado de actividad se puede describir como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 8. Estado de actividad de deslizamiento

Estado de Actividad		Distribución de Actividad	Modo de Actividad
Activo		Retrocediendo	Compleja
Reactivo		Avanzado	Compuesta
Suspendido		Ampliándose	Múltiple
		Confinada	Sucesiva
Inactivo	Latente	Ampliándose	Aislada
	Abandonado	Decreciendo	
	Estabilizado	Movimiento	
	Relicto		

Fuente: Garcia. M. (1998) *Manual de Estabilidad de Taludes*, INVIAS,

El deslizamiento objeto de este trabajo de grado, se clasifica como activo, lentamente se amplía en longitud hacia el sur con dos brazos que van hacia sur este y el sur oeste.

Tabla 9. Estado de Actividad, descripción de cada estado

Estado de Actividad	Descripción
Activo	Que se encuentra en movimiento
Suspendido	Que se ha movido en el último año pero no se está movimiento en el presente
Inactivo	Que no se ha movido hace más de un año
• Latente	Si tiene posibilidad de reactivarse por las causas del movimiento original
• Antiguo	Si las causas originales ya no lo afectan
• Estabilizado	Si se le aplican medidas correctivas que detienen el

Estado de Actividad	Descripción
	movimiento
Reactivo	Que se encuentra en movimiento después de haber estado inactivo

Fuente Garcia. M. (1998) *Manual de Estabilidad de Taludes*, INVIAS,

La actividad correspondiente al deslizamiento del sitio del estudio varia con la condición de pluviosidad de la zona, se clasifica como un movimiento activo de baja velocidad que se está ampliando hacia el sur.

4.5.2 Distribución de Actividad

Describe a grandes rangos los sitios donde se mueve el terreno deslizado, Varnes (1978) definió algunos términos que pueden usarse para describir la distribución de actividad en un deslizamiento. El movimiento puede estar limitado al material deslizado o la superficie de falla se puede estar extendiendo, aumentando el volumen del material en forma continua.

Puntualmente en el sitio de estudio, el deslizamiento está avanzando ya que se observó que la superficie de falla se extiende en dirección del movimiento.

4.5.3 Modo de Actividad

A continuación se presenta la clasificación de Varnes (1978) para describir las características de los materiales, el tipo de movimiento y la tasa de velocidad a la cual se presenta.

Tabla 10. Descripción de los movimientos según la tasa de movimiento, contenido de agua y tipo de material.

Según la tasa del Movimiento	Extremadamente rápido	
	Muy Rápido	
	Rápido	
	Moderado	
	Lento	
	Muy Lento	X
	Extremadamente lento	
Según el contenido de agua	Seco	
	Mojado	
	Húmedo	X
	Muy Húmedo	
Según el Material	Roca	
	Suelo	X
	Tierra	
	Detritos	
Según el tipo de Movimiento	Caída	
	Volcamiento	
	Deslizamiento	
	Propagación Lateral	X
	Flujo	
	Complejo	

Fuente: Gacia. M. (1998) Manual de Estabilidad de Taludes, INVIAS.

4.6 Velocidad de los movimientos en masa

Es posible establecer la velocidad que presenta un movimiento en masa, empleando esta velocidad se puede establecer el poder destructivo, las velocidades de los movimientos en masa se clasifican de 7 hasta 1, siendo el valor de 7 la velocidad más destructiva, y 1 la velocidad menos destructiva e imperceptible al ojo humano.

A continuación se indica la escala de velocidades de movimientos, propuesta por el Transportation Research Board de los Estados Unidos, la cual se considera como escala única de rata de movimiento.

Tabla 11. Escala de velocidad propuesta por Cruden y Varnes (1996).

Clase	Descripción	Velocidad (mm/seg)	Desplazamiento	Probable Importancia Destructiva
7	Extremadamente rápida	5×10^3	5 m/seg	Catástrofe de violencia mayor; edificios destruidos por el impacto o el material desplazado, muchas muertes, escape improbable.
6	Muy Rápida	5×10^1	3 m/min	Alguna pérdida de vidas; velocidad demasiado alta para permitir a todas las personas escapar.
5	Rápida	5×10^{-1}	1.8 m/hora	Escape posible; estructuras, propiedades y equipos destruidos.
4	Moderada	5×10^{-3}	13 m/mes	Algunas estructuras temporales y poco sensitivas pueden mantenerse temporalmente.
3	Lenta	5×10^{-5}	1.6 m/año	Construcciones remediales se pueden realizar durante el movimiento. Algunas estructuras pueden mantenerse con mantenimiento frecuente.
2	Muy Lenta	5×10^{-7}	16 mm/año	Algunas estructuras permanentes no son dañadas por el movimiento.

Clase	Descripción	Velocidad (mm/seg)	Desplazamiento	Probable Importancia Destructiva
1	Extremadamente lenta			Movimientos imperceptibles sin instrumentos; posible construcción pero teniendo ciertas precauciones.

Fuente: Cifuentes Zaldúa, D. L. (2011); *Modelación de vulnerabilidad física de estructuras de uno y dos pisos, asociada a deslizamientos.*

En los movimientos lentos, se puede realizar el monitoreo, para conocer la evolución, lo cual muy importante en las áreas urbanas o cuando está amenazada una obra importante de infraestructura (Vías, presas, oleoductos etc.), el monitoreo se realiza en la actualidad empleando equipos estacionales o comisiones topográficas. En este trabajo de grado, se plantea el uso de un equipo con tecnología nueva, con el fin de realizar el Monitoreo superficial de movimientos en masa, empleando tecnología LiDAR.

El sitio de estudio presenta una velocidad lenta y muy lenta, del orden de 90 mm/año o 0,9 m/año, los daños son evidentes en pocos meses, las señales de desplazamiento: obras existentes, obras reparadas, información de testigos, imágenes fotografías e imágenes antiguas indican que este es de velocidad clase 3 y 2; Construcciones remediales se pueden realizar durante el movimiento. Algunas estructuras pueden mantenerse con mantenimiento frecuente.

4.7 Clasificación según tamaño

La clasificación basada en el volumen del deslizamiento fue propuesta por Fell (1994); El volumen determina la magnitud del riesgo. Generalmente, a mayor volumen, mayor el riesgo. Sin embargo, en flujos o avalanchas, la velocidad puede ser más importante que el volumen total del deslizamiento.

Tabla 12. Clasificación del deslizamiento según su volumen.

Clase de Tamaño por Volumen	Descripción del Tamaño	Volumen (m3)
1	Extremadamente pequeño	< 500
2	Muy pequeño	500 a 5.000
3	Pequeño	5.000 a 50.000
4	Mediano	50.000 a 250.000
5	Medianamente grande	250.000 a 1.000.000
6	Muy Grande	1.000.000 a 5.000.000
7	Extremadamente grande	> 5.000.000

Fuente: Suarez. J. (s. f.) *Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico*,

El deslizamiento se clasifica como pequeño, clase de tamaño por volumen: 3, el volumen calculado del deslizamiento en promedio es de 24.407 m³.

Capítulo V

Monitoreo del Deslizamiento

Una vez establecido que el deslizamiento objeto del estudio se encuentra en movimiento, y que las lluvias en el país se han intensificado a partir del mes de abril del presente año (2016), se realiza el monitoreo del movimiento empleando el quipo LiDAR de propiedad del Dr. Diego Cobos, este monitoreo consto en realizar 4 visitas al sitio, en diferentes meses para tener un lapso de tiempo, el cual asegurará percibir un desplazamiento de la masa de suelo, y que dicho desplazamiento fuera detectable y medible con el equipo LiDAR.

5.1 Funcionamiento del LiDAR.

El escáner láser terrestre es un dispositivo de adquisición de datos masivos, que nos reporta una nube de puntos generada tridimensional, a partir de la medición de distancias y ángulos, mediante un rayo de luz láser.

Básicamente es una estación topográfica de medición sin prisma, que realiza observaciones masivas sobre áreas preseleccionadas. Además, cuenta con la incorporación cámaras fotográficas, que registran la información del rango visible, lo que aporta una información infinita del objeto.

Se trata de una tecnología en desarrollo, que se puede considerar el futuro en el mundo de la Topografía, el potencial que presenta esta tecnología es altísimo, obteniendo en las mediciones, una cantidad masiva de datos donde todo lo que exista en la realidad quedará representada mediante puntos tridimensionales.

En Topografía se distinguen principalmente dos tipos de sensores láser a utilizar:

- Corto alcance, utilizados sobre todo en objetos cercanos y de un tamaño limitado. Es usado en Topografía industrial, así como en restauración de estatuas, o estudios accidentales de tráfico.

- Largo alcance, donde encontramos una precisión menor debido a la distancia. Son utilizados principalmente en cálculos de volumen, restauración de fachadas, etc.

Cabe destacar que la mayor dificultad residirá en la unificación y limpieza de los datos obtenidos a partir del registro en las diferentes posiciones adoptadas, lo que permitirá formar el modelo 3D del objeto concreto.

5.2 Realización de modelo a escala.

Se ha realizado el escaneo de un modelo a escala para demostrar el funcionamiento y la metodología aplicada al talud objeto del estudio, con este modelo a escala se busca determinar los desplazamientos de una superficie desplazada a propósito, y observar el alcance y eficacia de la técnica y del equipo, de esta manera, y siguiendo este principio, se realizó el monitoreo del talud ubicado en la vereda de pajarito, con el fin de establecer un monitoreo en función del desplazamiento de la masa de suelo presente.

Se emplearon cuatro esferas de posicionamiento para implantar puntos base del escaneo, así mismo se utilizó un cartón para simular la superficie de un talud, con el objeto de desplazar dicho cartón simulando un deslizamiento y establecer el desplazamiento de la masa.



Figura 68. Realización de modelo a escala, equipo, esferas y modelo. Fuente: Elaboración propia.



Figura 69. Esferas de referencia y modelo. Fuente: Elaboración propia.

Se realizó un primer escaneo ESCANEO 1, como base del monitoreo y tener un punto de partida para determinar los desplazamientos del talud a escala (carton).

En este escaneo se puede observar el cartón el cual simula la superficie de un talud, y las cuatro esferas, las cuales son puntos de referencia fuera de la zona del deslizamiento para poder hacer una comparación entre el ESCANEEO 1 y el segundo escaneo ESCANEEO 2.

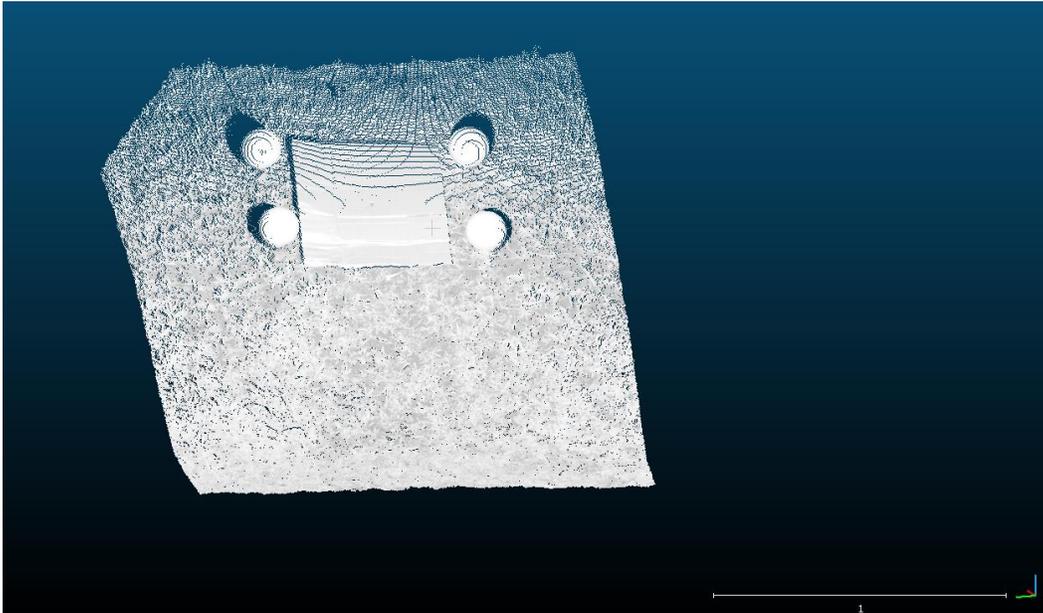


Figura 70. Imagen digital del modelo a escala. Fuente: Elaboración propia. Software; Scene. Faro.

Las esferas son puntos de referencia, las cuales tienen coordenadas en los tres ejes X, Y y Z, y no pueden ser movidas hasta que se termine el escaneo, para el caso particular del talud monitoreado, se emplearon señales en aluminio y elementos propios de la zona como puntos de referencia (postes, muros y obras) fuera de la zona del deslizamiento y así determinar los desplazamientos.

Una vez realizado el ESCANEEO 1 y tener una clara vista e información de la zona a monitorear, se realiza el ESCANEEO 2, donde se ha desplazado a propósito el cartón simulando un deslizamiento, y poder determinar los desplazamientos ocurridos entre los dos escaneos.

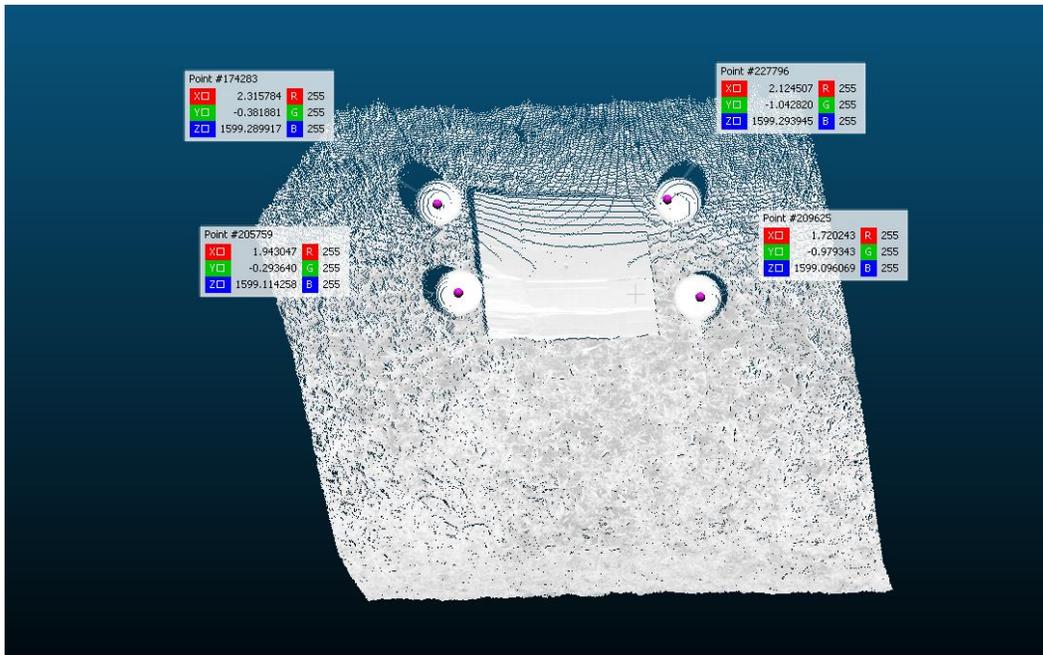


Figura 71. Correspondencia de esferas como puntos de referencia. Fuente: Elaboración propia. Software; Cloud Compare.

Los archivos de nube de puntos son llevado al software Cloud Compare, de danielgm.net - EDF R&D, el cual permite compara dos nubes de puntos y establecer las diferencias entre los puntos, tomando como referencia las cuatro esferas.

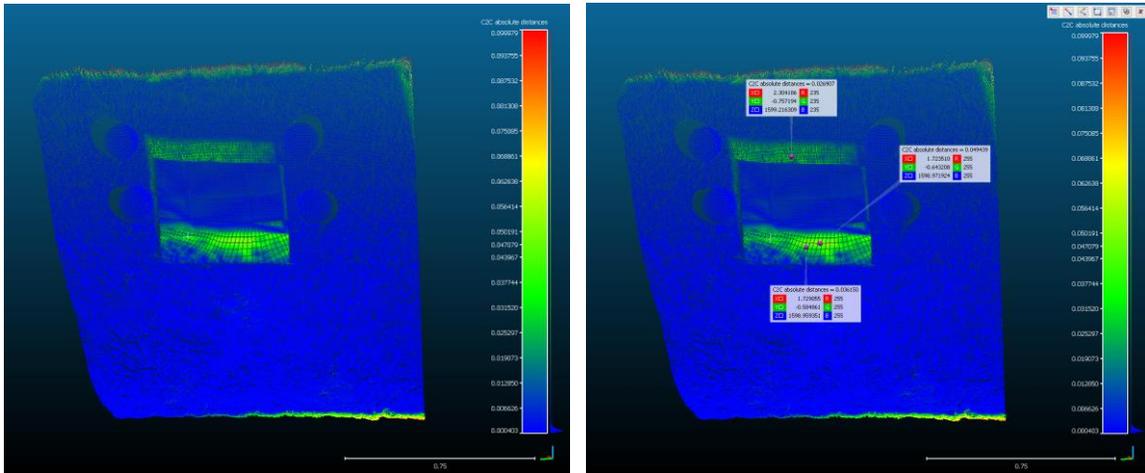


Figura 72. Determinación de magnitudes de desplazamientos. Fuente: Elaboración propia. Software; Cloud Compare.

Una vez comparadas las dos nubes de puntos: ESCANEADO 1 y ESCANEADO 2, se pueden determinar los desplazamientos presentes entre los dos escaneos, estos desplazamientos son del orden de centímetros; máximo 5 centímetros, que es efectivamente lo que se desplazó el talud simulado por cartones.

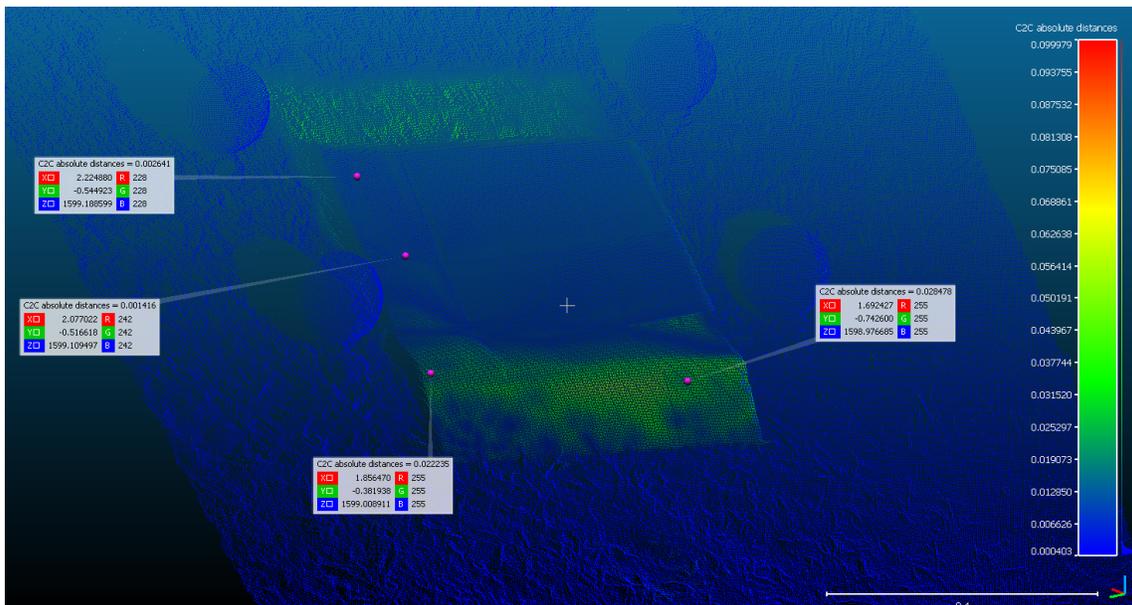


Figura 73. Magnitudes de desplazamientos. Fuente: Elaboración propia. Software; Cloud Compare.

Es posible conocer el desplazamiento de los puntos, ya que se está haciendo una comparación de la ubicación de cada punto del ESCANEEO 1 con la nueva ubicación de cada punto del ESCANEEO 2, por consiguiente, si se desea conocer el desplazamiento un una estructura existente o de la superficie de una zona en particular, solo se debe contar con la existencia de dos nubes de puntos y hacer su comparación tomando como referencia puntos inamovibles.

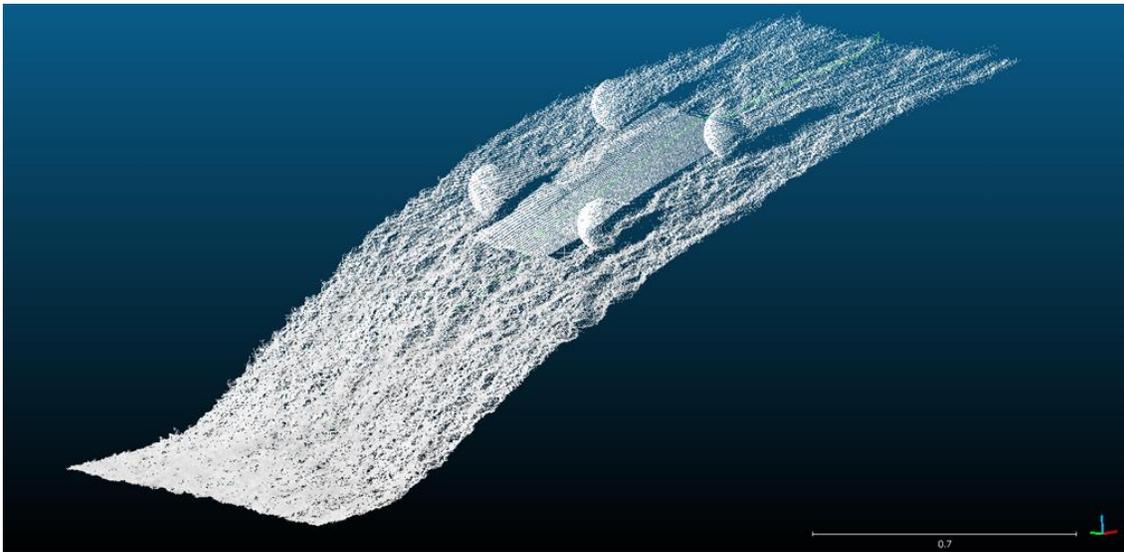


Figura 74. ESCANEEO 1 base, con línea donde se generará el perfil. Fuente: Elaboración propia. Software; Cloud Compare.

El software Cloud Compare también permite trazar perfiles de las superficies capturadas, esto es de gran utilidad en el momento de comparar visualmente los desplazamientos que se han presentado en un mismo sitio pero tras algún tipo de movimiento, a continuación se presentan los dos perfiles correspondientes al ESCANEEO 1 y ESCANEEO 2 del modelo a escala:

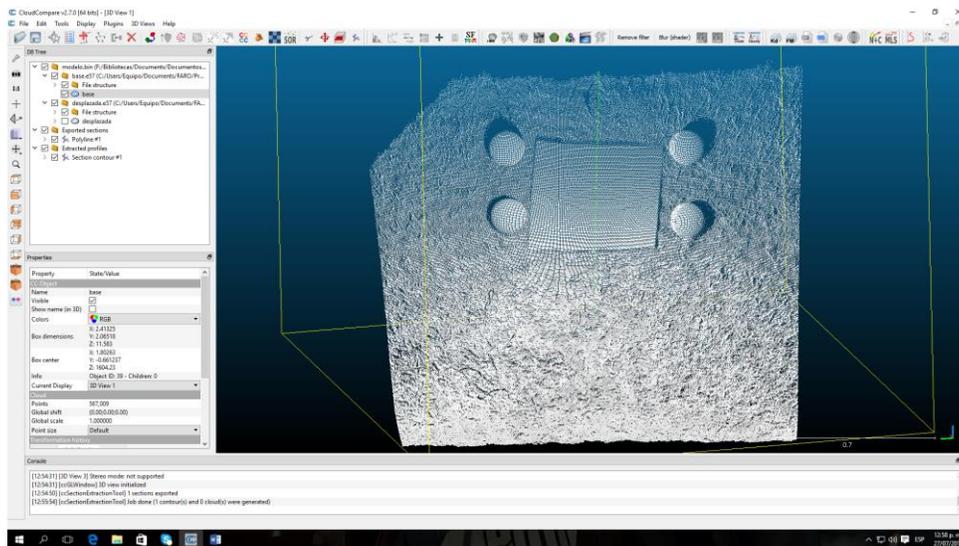


Figura 75. Trazado en planta de la ubicación de la línea de perfil, antes de la ocurrencia de desplazamientos. Fuente: Elaboración propia. Software; Cloud Compare.

Empleando el software, se traza la línea en planta correspondiente al perfil que se desea obtener, y se traza el perfil correspondiente al ESCANEO 1. (línea central vertical color verde)

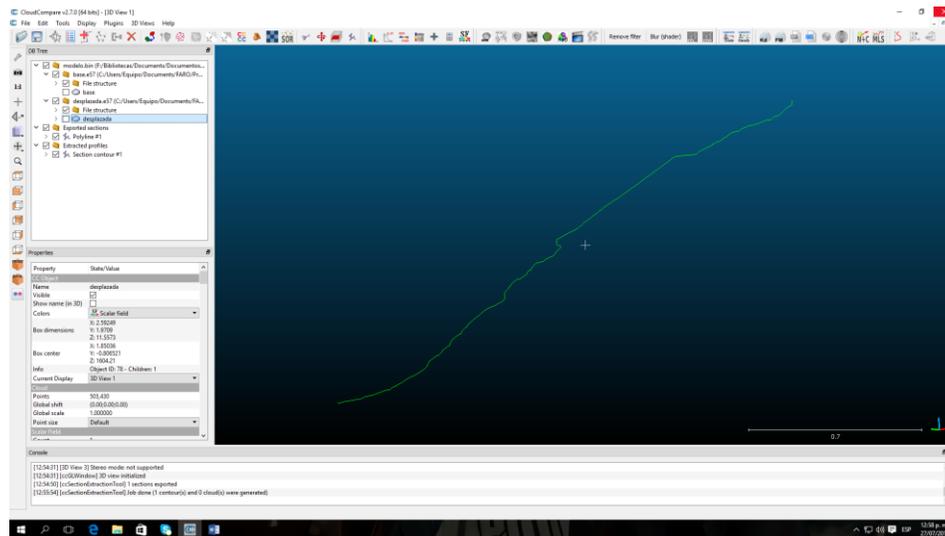


Figura 76. Perfil del ESCANEO 1, antes de generar desplazamientos en su superficie. Fuente: Elaboración propia. Software; Cloud Compare.

Este paso se repite, pero ahora con la nueva superficie tras el desplazamiento correspondiente al ESCANEEO 2, se comparan los dos perfiles en una misma área de trabajo, donde el perfil de color blanco, corresponde a la superficie base que para este ejemplo a escala es llamado ESCANEEO 1.

Se pueden observar los cambios en la topografía en los sitios donde se generó el desplazamiento a escala del talud representado por el cartón.

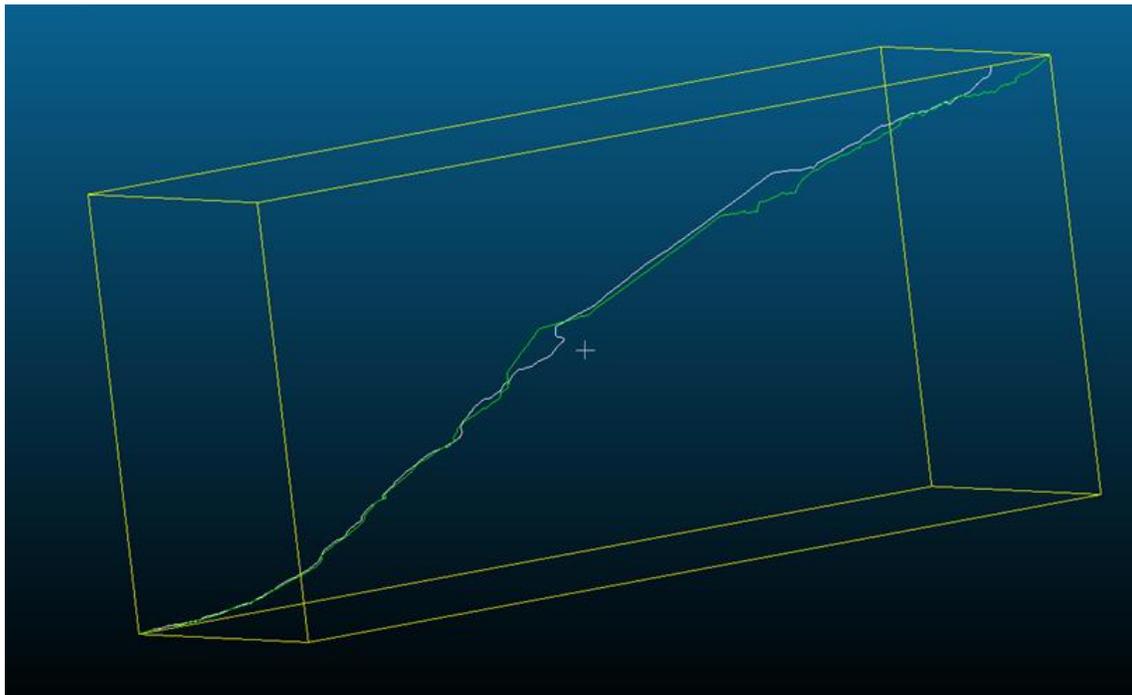


Figura 77. Comparación de perfiles empleando Cloud Compare, ejemplo a escala. Fuente: Elaboración propia. Software; Cloud Compare.

Con este ejercicio a escala, se busca hacer una demostración de la metodología y equipo empleado en la realización del monitoreo del talud objeto del estudio, así como del análisis y procesamiento de la información empleando nubes de puntos, la información adquirida es de gran utilidad para ubicar y comparar cambios en las topografías de los taludes, y determinar lugares puntuales donde más movimientos o deformación se generen a causa de factores inestables.

5.3 Aplicaciones Geotécnicas.

Como ejemplo de la implementación de estos equipos en el desarrollo de la ingeniería geotécnica, a continuación se presentan resumidamente tres casos, enfocados únicamente al uso dado a la metodología LiDAR:

5.3.1 Caso Histórico 1; “El deslizamiento de ladera en noviembre 2007 y generación de una presa natural en el río Grijalva, Chiapas, México”

La noche del 4 de noviembre de 2007 un deslizamiento de ladera con una extensión de 80 hectáreas que acarreó 48 millones de metros cúbicos de roca y suelo, formó una presa natural que interrumpió el cauce natural del río Grijalva, uno de los más caudalosos de México. El tapón de 80 m de alto, 800 m de largo y 300 m de ancho, se emplazó entre las presas Peñitas (aguas abajo) y Malpaso (aguas arriba). La localidad de San Juan de Grijalva, ubicada en la margen derecha del río, fue afectada por el movimiento en bloque del terreno y por la inundación repentina de una gran ola producto del deslizamiento, los cuales resultaron en la muerte de 25 de sus habitantes.

Con apoyo en herramientas de sistemas de información geográfica y teledetección, se presentan el deslizamiento y la cuenca del río Grijalva en el contexto del bloqueo natural de su caudal así como las condiciones anómalas de precipitación durante octubre y principios de noviembre de 2007. Se muestra una perspectiva antes y después del evento mediante modelos digitales del terreno e imágenes satelitales de alta resolución espacial. El modelo digital del terreno posterior al deslizamiento fue generado a partir un levantamiento LiDAR aerotransportado. Con estos insumos se construyeron pares estereoscópicos sintéticos, uno previo al deslizamiento, para la fotointerpretación de lineamientos, y uno posterior, para la visualización del fenómeno.

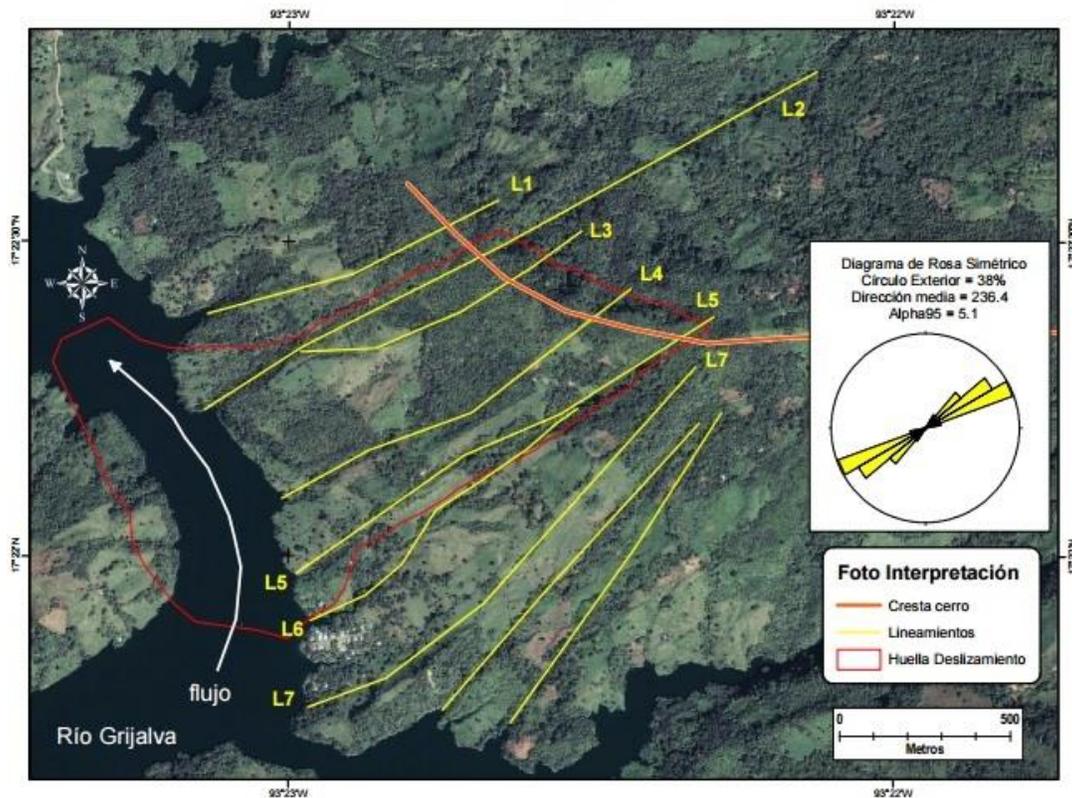


Figura 78. Foto Interpretación LiDAR aéreo. Fuente: Rodríguez M. V., Munguía Orozco L. & Meillón O. (2011) “El deslizamiento de ladera de noviembre 2007 y generación de una presa natural en el río Grijalva, Chiapas, México; Alejandro Hinojosa, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen 63, núm. 1, p. 15-38;

5.3.2 Caso Histórico 2; “Monitorización de un Talud en Yesos Mediante Laser Escáner Terrestre (LiDAR): El Caso de la Peña de Finestrat, Alicante.

Los resultados obtenidos mediante la monitorización de un talud en yesos masivos de facies Keuper en el núcleo urbano de Finestrat (Alicante), son el resultado de las campañas de adquisición de datos mediante el LIDAR, estas mediciones se realizaron entre febrero de 2011 y agosto de 2012, y han permitido identificar el desprendimiento de un bloque rocoso de unos 100 m³ de volumen así como tres caídas de rocas de menores dimensiones.

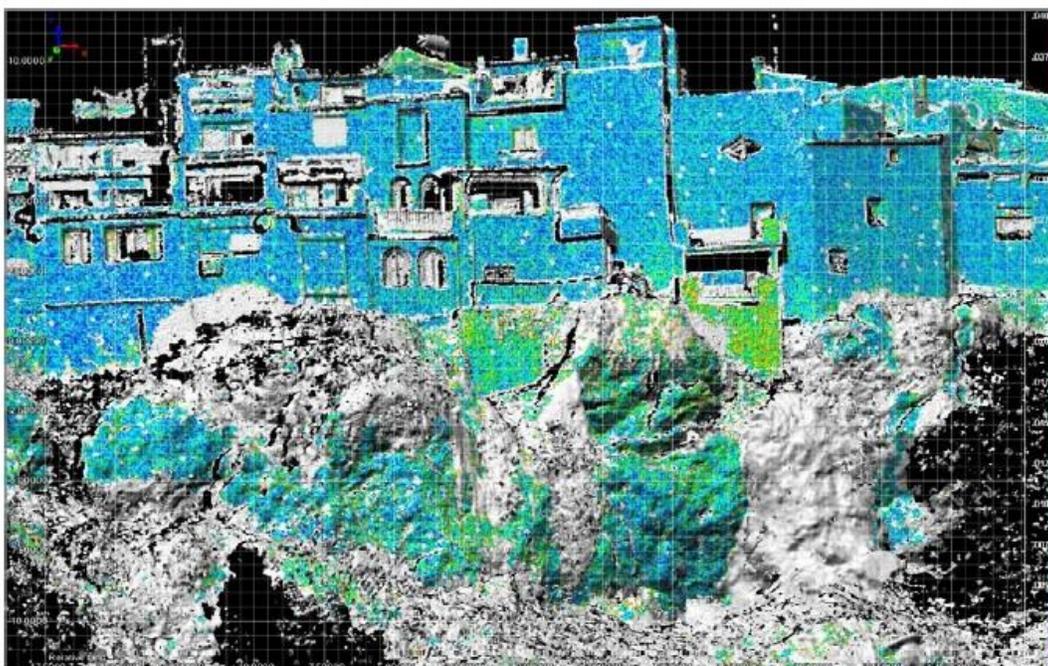


Figura 79. Monitorización de talud rocoso en la Peña de Finestrat, Alicante. Fuente: Alonso E., Corominas J. y Hürlimann M. (Eds.) (2013) *VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables Palma de Mallorca*, Junio CIMNE, Barcelona

Asimismo, los datos LIDAR han permitido medir desplazamientos de orden centimétrico en algunos de los elementos constructivos de las edificaciones situadas en la coronación de la ladera, que se encuentran a su vez intensamente dañadas. Las inestabilidades observadas parecen indicar la existencia de un movimiento general de este sector de la ladera que actúa como desencadenante local de los desprendimientos mediante el LIDAR, afectando a su vez a las edificaciones asentadas en su coronación (Alonso, Corominas, & Hürlimann, 2011).

5.3.3 Caso Historico 3; “Deslizamiento en la Ruta Nacional N°1 kilómetro 44 + 400 en Costa Rica”.

Hacia el año 2011 ocurrió un deslizamiento que afectó parte de la carretera de la Ruta Nacional N°1 , en el kilómetro 44+400, en el lado izquierdo de la vía en el sentido San José – San Ramón, frente a la Estación de Servicio Panamericana.

El deslizamiento principal y estudiado aquí, ocurrió en un sitio donde afloran materiales de la Unidad Lacustre Palmares, la cual está constituida por sedimentos finos laminados que presentan un color blancuzco, con presencia de pómez de color café y diatomitas. En febrero del 2014, utilizando el equipo de escaneo ládar del PITRA-Lanamme-UCR, se obtuvo el registro digital tridimensional de la condición actual del deslizamiento, El equipo se programó en una resolución alta, con lo que se pudo capturar detalles en el talud afectado y la estación de servicio ubicada al otro costado de la carretera.

Mediante un perfil transversal del deslizamiento realizado con la información ládar, se demostró que una de las secciones más críticas estudiadas, presenta un sector en la parte superior casi vertical, con una caída de aproximadamente 4 m. Luego se identificó un tramo de transición cercano a los 5 m de altura y aproximadamente 7 m de ancho.

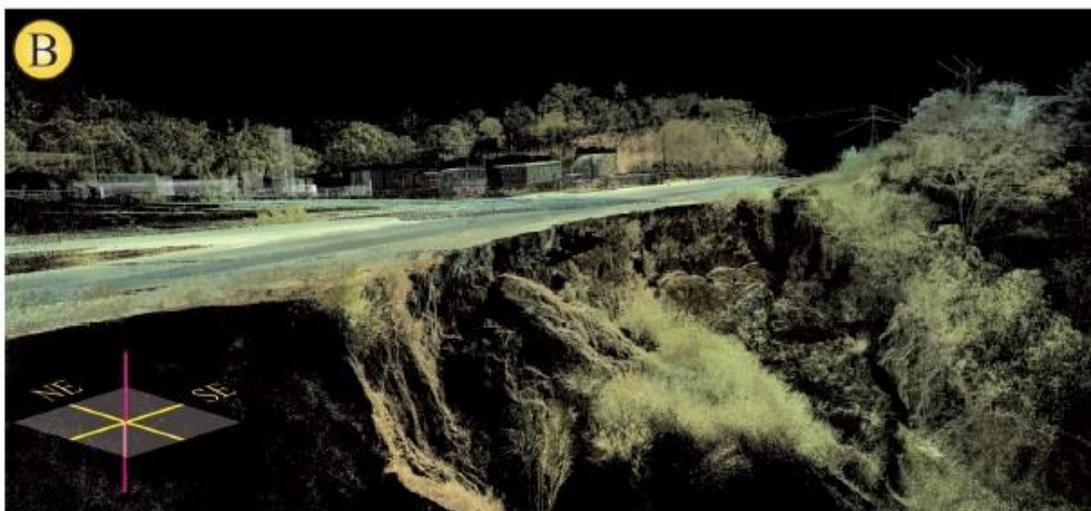


Figura 80. Captura de talud con desprendimiento de material. Fuente: Rev. Geol. Amér. Central n.51 San Pedro de Montes de Oca Jul./Dec. 2014; El Uso de Imágenes Ládar en Costa Rica: Casos de Estudio Aplicados en Geología, Ingeniería y Arqueología

En la parte inferior de este talud se podría explorar la factibilidad de cimentar una eventual obra de estabilización. Los datos anteriores son esenciales para su diseño, que deben tomar las características geotécnicas del material y la disposición geométrica del deslizamiento. (Ruiz, Garro, & Soto, 2014)

5.4 Información del monitoreo realizado.

A continuación se presentan las fechas en las que fueron realizadas las visitas al sitio del estudio:

- Noviembre 14 del 2015 (visita 1)
- Enero 23 del 2016 (visita 2 + escan 1 = ESCANEEO 1)
- Abril 09 del 2016 (visita 3 + escan 2 = ESCANEEO 2)
- Junio 27 del 2016 (visita 4 + escan 3 = ESCANEEO 3)

En la primera visita realizada en el mes de Noviembre del año 2015, se identificó el sitio más adecuado para el estudio, las variables tenidas en cuenta fueron:

- Sitio con obras de construcción, las cuales son tomadas como referentes visuales y topográficos para medir desplazamiento.
- Seguridad para el personal y equipos.
- Evidente problema de estabilidad de material.
- Cercanía a la ciudad de Medellín por condiciones de transporte.
- Topografía accesible que no representara riesgo.
- Permisos del dueño del lote y conocimiento de los trabajos por parte del viviente.
- Poca vegetación, para realizar las mediciones con el equipo LiDAR.

En la segunda, tercera y cuarta visita, se realizaron mediciones con el equipo, el cual debió ser posicionado en diferentes puntos en un mismo día sobre el deslizamiento, debido a la magnitud del mismo, se tiene que tener en cuenta que todos los elementos sobre el deslizamientos son capturados con precisión milimétrica, ya que el equipo realiza un escaneo del área a 360° en dirección horizontal y 270° en dirección vertical, resultando de esta una nube de millones de puntos precisamente capturas de la zona.

Tras cada medición se realizó un post-procesamiento de la información, la cual se fue analizando para determinar variables como magnitud de desplazamiento y volúmenes superficiales de movimiento.



Figura 81. Escaneo de la vía que comunica al municipio de San Pedro, equipo LiDAR estacionario sobre trípode de apoyo, y ubicado sobre muro de gavión existente al costado norte de la vía. Fuente: Elaboración Propia.

5.5 Objetivos del monitoreo:

Para determinar el monitoreo a realizar en el sitio de estudio, anteriormente se había realizado una tarea de observación de campo, en la cual se identificaron las causas probables del deslizamiento y los límites posibles del movimiento en cuanto a profundidad y extensión en planta, empleando información existente, referencias de personas locales e imágenes.



Figura 82. Levantamiento del flanco occidental con equipo LiDAR. Fuente: Propia.

Adicionalmente, se investigo acerca de la geología y geomorfología, y se tuvo en cuenta el historial de lluvias de la zona, antes de continuar con el monitoreo empleando el equipo LiDAR, se había planteado una teoría sobre el posible mecanismo de falla; Lo que se pretende con un programa de monitoreo, es corroborar la validez o no, de las teorías propuestas y la cuantificación de ciertos parámetros y procesos, conocer las anteriores variables permitió tener avanzado el estudio del deslizamiento, en un gran porcentaje.

5.5.1 Objetivos de la Instrumentación:

Las situaciones típicas en las cuales se requiere la instrumentación, son las siguientes:

- Determinación de la profundidad y forma de la superficie de falla en un deslizamiento activo.
- Determinación de los movimientos laterales y verticales dentro de la masa deslizada.

- Determinación de la rata o velocidad de deslizamiento.
- Monitoreo de la actividad de cortes o rellenos e identificación de los efectos de una determinada construcción.

En el presente trabajo, se está dando cumplimiento a la mayoría de los objetivos de un monitoreo, así mismo, también se destaca la viabilidad en la determinación de las características de un deslizamiento empleando el equipo LiDAR y observación de campo.

5.6 Equipo para el monitoreo

El LiDAR, está siendo usado en la actualidad de manera muy frecuente para el monitoreo de taludes, ríos y líneas costeras, básicamente existen dos tipos de LiDAR, el equipo terrestre y el equipo aéreo. El equipo terrestre crea una superficie basada en un modelo digital, donde dispara laser realizando un escaneo de la superficie, y calcula distancia de la señal que regresa, la ventaja del equipo es; que crea una nube de punto de gran cantidad de información y calidad sub métrica.

Una de las desventajas del equipo es la vegetación, esta vegetación crea falsas superficies en el terreno y deben ser “removidas” de los datos adquiridos.

Cuando se tiene una superficie clara, y de óptima calidad, el equipo puede detectar pequeños cambios en la superficie, lo que lleva a establecer movimientos en el terreno, estos equipos son una alternativa clara frente a costos y tiempos de análisis de información, y ni hablar de la precisión de los datos (Guthrie & Cuervo , 1973).

La interpretación de inventario de deslizamientos utilizando LiDAR es mucho más precisa que los métodos tradicionales fotogramétricos (Falls y otros, 2006). LIDAR permite identificar con mayor precisión los deslizamientos profundos antiguos, coluviones y flujos.

La principal fortaleza del LIDAR es la precisión que permite mapear deslizamientos pequeños (Drazba, 2007). El LiDAR registra datos de posición (x, y) y de elevación (z) en

intervalos predefinidos. Con los datos obtenidos se genera una nube de puntos muy densa.

Para la realización de este monitoreo, se ha empleado el equipo FARO® Laser Scanner Focus3D.

5.7 Metodología del monitoreo en campo.

Para el desarrollo del monitoreo del sitio de estudio, además de las razones geomorfológicas anteriormente citadas en el documento, se suma la razón a que el sitio ofrecer una mejor respuesta a escaneo mediante laser escáner; En este caso movimientos, concretamente deslizamientos diacronicos¹², es fundamental que exista una cobertura vegetal baja, y sitios estables donde ubicar el equipo, para tener siempre puntos de referencia de los movimientos que van ocurriendo en la superficie del terreno.

Tomando como referencia y ajustando la metodología empleada por Palenzuela et al 2011. A continuación se presenta la metodología empleada en este trabajo de grado.

Antes de proceder a escanear los movimientos, previamente se establece la selección de los puntos donde se situara el Laser Escaner o puntos de análisis, de tal forma que se cubra el movimiento completo para construir un modelo digital del terreno sin sombras, minimizando zonas sin puntos que posteriormente den falsa información de desplazamientos. Hay que buscar el equilibrio entre un numero de tomas suficiente para cubrir todo el movimiento de tal forma que no se obtenga un volumen de datos inmanejable y se requiere de mucho tiempo en el sitio, recordando que esta metodología busca minimizar los tiempos en campo y tiempos en el análisis de información en oficina.

¹² Deslizamiento lento y observable en el tiempo, movimiento lento, ocurrencia de evento durante un periodo de tiempo.

Tabla 13. Metodología fase de planeación.

ETAPA	TAREA	OBSERVACIONES
PLANIFICACION	Selección de movimiento.	Revisión de inventarios, cartografía e información de referencia a su actividad.
	Selección de puntos de escaneo.	Localizar el mínimo número de ubicaciones (ARMADOS) aumentando el área de captura. Minimizar holes (zonas de sombra) y posibles interferencias, de vehículos, animales y personas.
	Temporalización de escaneo.	Establecer el recorrido del monitoreo en función con la dimensión del mismo y la topografía del deslizamiento.

Fuente: Tomado y ajustado de Palenzuela et al 2011.

La primera fase de planificación se realizó tras visitar varios sitios con presencia de deslizamientos en las afueras de la ciudad de Medellín, y tras visitar a varios sitios inestables en el departamento de Boyacá, municipio de Miraflores. Finalmente se estableció el sitio de estudio ubicado en la vereda de Pajarito a las afueras de Medellín, sobre la vía que comunica el municipio de Medellín con San Pedro.



Figura 83. Zona de estudio, sentido del movimiento, obras existentes y vía actual. Fuente:

Alcaldía de Medellín, Recuperado de:

https://www.medellin.gov.co/MapGIS/web/swf/MAPGIS_FLEX.jsp

Las distancias de desplazamientos entre la ciudad de ubicación del equipo, la magnitud de los movimientos (magnitud de deslizamientos; magnitudes medias a pequeñas), el tiempo de llegada a los sitios (tiempo de desplazamiento al sitio) y la velocidad de desplazamiento de la masa (evidencia de movimientos del suelo y masas en movimiento actualmente), fueron las variables determinantes para escoger el sitio de estudio.

Una vez establecido el sitio del estudio, se hace un recorrido para establecer de manera visual los límites del deslizamiento, de este modo se plantea el número de escaneos por jornada de trabajo, así como las ubicaciones del equipo y de las esferas de referencia.



Figura 84. Esferas de referencia ubicadas sobre el sitio de estudio. Fuente: Propia.

Las esferas de referencia son elementos circulares de color blanco y fabricadas en fibra de vidrio resistente, estas esferas por su forma y color que contrasta con la naturaleza, permiten ser ubicadas por el lector laser del equipo, las esferas de referencia son fundamentales en los casos que se requiere realizar más de un escaneo en sitio, permiten tener “amarrados” los puntos unos de otros y así poder generar un solo modelo digital de la superficie.

Estos elementos deben ser colocados sobre el deslizamiento pero en lugares que sean visibles para el LiDAR, los sitios no deben moverse con facilidad y siempre deben colocarse tres esferas en la posición inicial del anterior escaneo.



Figura 85. Equipo LiDAR terrestre, y las tres esferas de referencia. Fuente: Elaboración Propia.

En la fotografía anterior, es importante resaltar que las tres esferas deben estar a la vista y alcance del equipo, el equipo registrará la ubicación de las esferas en coordenadas X, Y y Z, en el caso de que el equipo sea movido para una nueva posición, deben instalarse otras tres esferas en nueva posición pero manteniendo las tres esferas iniciales en su posición original para permitir el traslape de las imágenes digitalizadas del anterior escaneo con el nuevo. Debido a la magnitud del movimiento, y a la importancia que representa la vía, se fabricaron e instalaron 4 señales en lámina de aluminio y tubería galvanizada, estas señales fueron diseñadas siguiendo las recomendaciones del director del trabajo de grado y requisitos del software Scene de Faro, las señales fueron instaladas en unos sitios específicos al borde de la carretera y fuera de la masa en movimiento, el objetivo de estas señales es servir de puntos de referencia topográfica y visual al equipo LiDAR, y así poder realizar un empalme de imágenes con mayor

precisión, ya que estas señales debido a su tamaño, ubicación y diseño, fueron fácilmente identificables por el equipo y el software.

Tabla 14. Metodología fase de Trabajos de campo.

ETAPA	TAREA	OBSERVACIONES
TRABAJO DE CAMPO	Colocación de puntos de control sobre el terreno	Evaluar la accesibilidad al sitio, evaluar riesgos de ingreso y de zona, determinación de fronteras del movimiento.
	Adquisición de datos en campo con equipo	Instalación de equipo en los puntos establecidos anteriormente, empleo de esferas de referencia.
		Ejecución de escaneos, avance de trabajos sobre el deslizamiento.

Fuente: Tomado y ajustado de Palenzuela et al 2011.

El inicio de las actividades de campo, se realiza con la información recopilada y las condiciones actuales del deslizamiento, es importante evaluar las condiciones de seguridad de ingreso al sitio, para este caso particular, el predio es de propiedad privada y se cuenta con el permiso del propietario y conocimiento del viviente.

Otras condiciones de seguridad son las establecidas por agentes externos, como condiciones sociales; pueblos, o comunidades vecinas, y condiciones de mayor riesgo como la presencia de grupos armados al margen de la ley. Durante el desarrollo del presente trabajo de grado, no se presentaron dichas condiciones de seguridad.



Figura 86. Señales de referencia fabricadas e instaladas. Fuente: Elaboración Propia.

La ubicación del equipo de monitoreo se realiza desde arriba hacia abajo; es decir, se van realizando las mediciones desde la corona del talud, bajando por el cuerpo del deslizamiento hacia el pie o pata del talud (siempre y cuando sea posible en acceso en campo), esto permite tener una visual general de la masa, también permite una fácil determinación de la ubicación del equipo y las esferas de referencia, a medida que se realiza el recorrido y se instala el equipo para realizar nuevamente escaneos, se hacen anotaciones de observaciones realizadas en sitio y se toman fotografías. El recorrido también se realiza en sentido horizontal a la dirección del desplazamiento, esto con el objeto de tener un área representativa digitalizada, entre mayor sea el área (y esta se encuentre dentro de los límites del deslizamiento), mayor es la información recopilada para el estudio.

Tomando como referencia imágenes satelitales (google earth), se busca explicar mejor el procedimiento de monitoreo empleando en las cuatro visitas realizadas al sitio de estudio:



Figura 87. Zona del sitio de estudio. Fuente: Google Earth, (2016) DigitalGlobe, y elaboración propia.

El levantamiento y primer monitoreo del sitio del estudio, se inició realizando un modelo digital de la vía que comunica Medellín con San Pedro, esta vía recientemente fue reparada su estructura de pavimento, pero con carencia de obras geotécnicas importantes que buscaran la estabilidad completa del sitio.



Figura 88. Inicio de actividades de monitoreo del sitio de estudio. Fuente: Google Earth, 2016 DigitalGlobe, y elaboración propia.

Los círculos amarillos representan los puntos donde se ubicó el equipo LiDAR, y se escaneo la superficie, los vehículos que transitan esta vía (TPD no mayor a 1000 vehículos), no presentaban problemas al momento de la digitalización de las imágenes, ya que estas son sometidas a una fase de “limpieza”, donde es eliminado todo lo que no debe estar en el estudio.



Figura 89. Metodología del monitoreo, recorrido de todo el deslizamiento. Fuente: Google Earth, 2016 DigitalGlobe, y elaboración propia.

Una vez digitalizada la carretera y los elementos adyacentes a ella, se continúa con el monitoreo del sitio, iniciando desde la corona del talud y hacia la pata pero también realizando un desplazamiento horizontal, asegurándose se digitalizar los flancos del deslizamiento y más importante la topografía con una resolución adecuada y libre de elementos que pueden afectar el modelo digital.

Los escaneos 1 y 3, además de tomar buena parte de la carreta, y gracias a la versatilidad del equipo, también toman puntos de la superficie de la corona del talud, imágenes que se empalman con las tomadas por el escaneo 5. De esta manera es importante resaltar que todos los escaneos se complementan, donde las imágenes finalmente deben quedar traslapadas en un solo modelo digital de la superficie, con

coordinada, curvas de elevación y precisión milimétrica superando a una comisión topografía en tiempo y calidad de la información.

Las imágenes tomadas con los escaneos 6 y 7, se empalman a su vez con las tomadas en el escaneo 5, y así sucesivamente, por esta razón, se realizan estos escaneos cuando se observan cambios de pendiente o existe la presencia de obstáculos visuales tales como obras de drenaje y arboles presentados en este caso.

Cada levantamiento completo de este talud, con toma de fotografías y siguiendo la metodología anteriormente descrita tardo entre 2 a 3 horas, empleando dos personas, un trípode, el equipo LiDAR y seis esferas.

Tabla 15. Metodología fase trabajo de oficina.

ETAPA	TAREA	OBSERVACIONES
TRABAJO DE OFICINA	Post-procesamiento de datos	Corrección de coordenadas geodésicas, post proceso de las nubes de puntos.
	Análisis de información	Aplicación de software para análisis de información.
		Comparación de nubes de puntos en Cloud Compare.
		Determinación de variables.

Fuente: Tomado y ajustado de Palenzuela et al 2011.

Cuando se tiene la información de campo tras la jornada de trabajo, se realiza el post procesamiento de datos, donde se deben “limpiar” las nubes de puntos de elementos que impiden tener claridad de la necesidad. Vegetación, vehículo, animales y personas son eliminados de las nubes de puntos, lo que se busca es tener una superficie limpia, donde sea observable la topografía de la zona y las desplazamientos en la superficie tras varias mediciones en el tiempo.

A continuación se presenta una captura de pantalla durante la aplicación del software para el análisis de la información, donde se puede ver las diferentes ubicaciones (armados) del equipo durante el ESCANEO 3, para poder tener el modelo digital completo de la zona a estudiar.

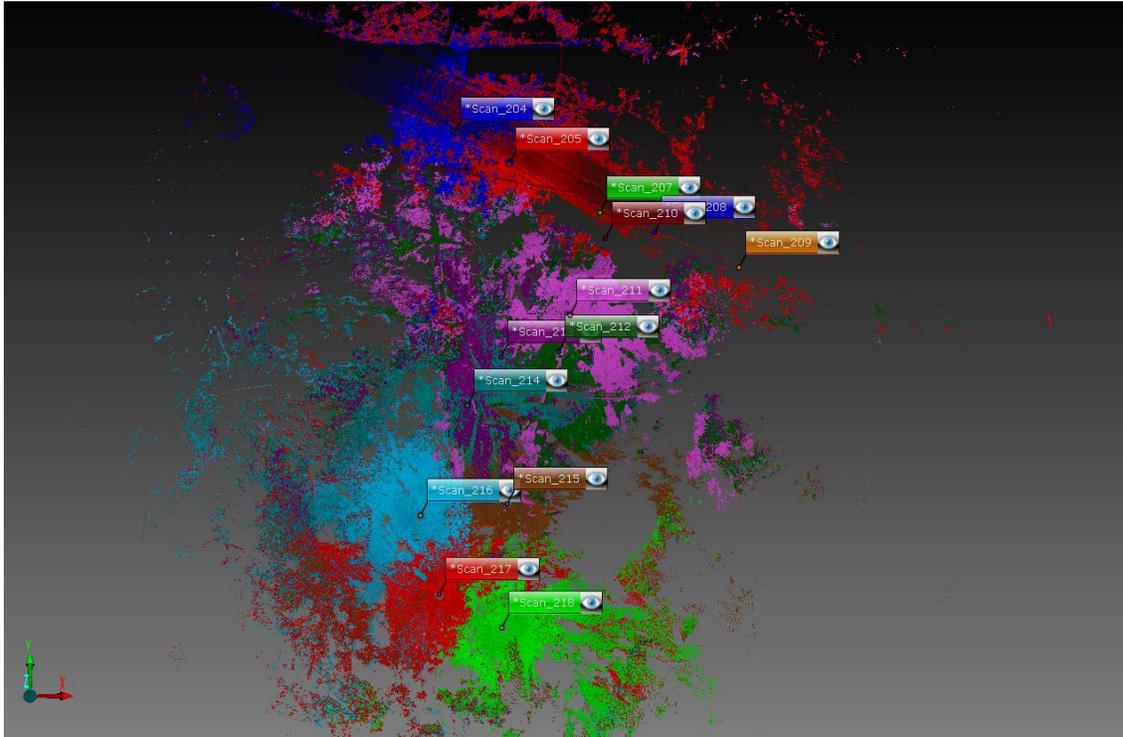


Figura 90. Ubicación de equipo en campo “armadas”. Fuente: Elaboración Propia, Software: Cloud Compare.

Donde se muestran unos indicadores sobre el deslizamiento, en el lugar donde se armó el equipo LiDAR, esto quiere decir que se armó 14 veces durante el mismo día con la intención de cubrir la totalidad del área y no tener holes de datos (zonas sin puntos o zonas de sombras), los puntos de colores indican los puntos nuevos tomados por cada ubicación de armado, el número final de cada etiqueta indica el orden del escaneo.

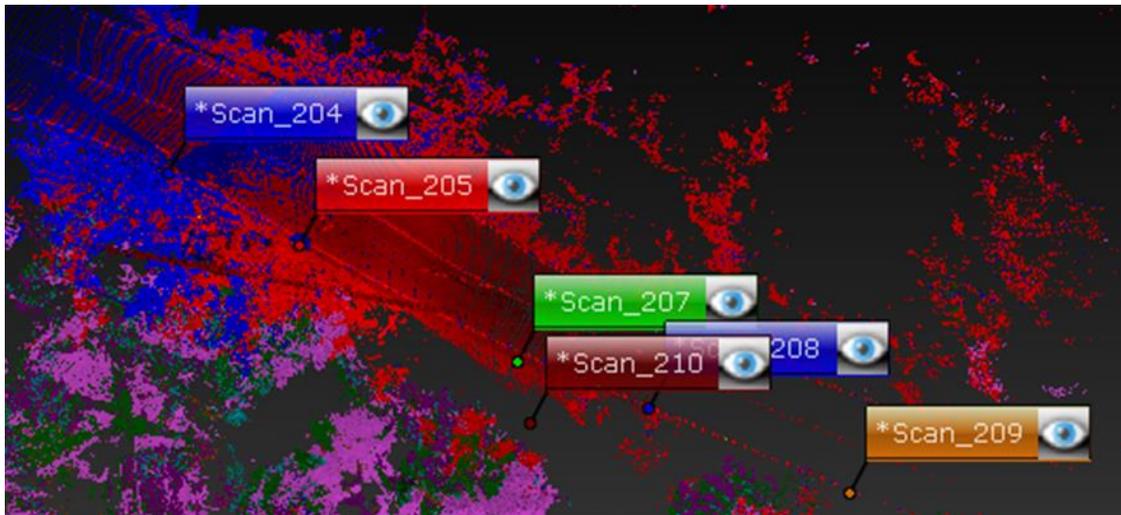
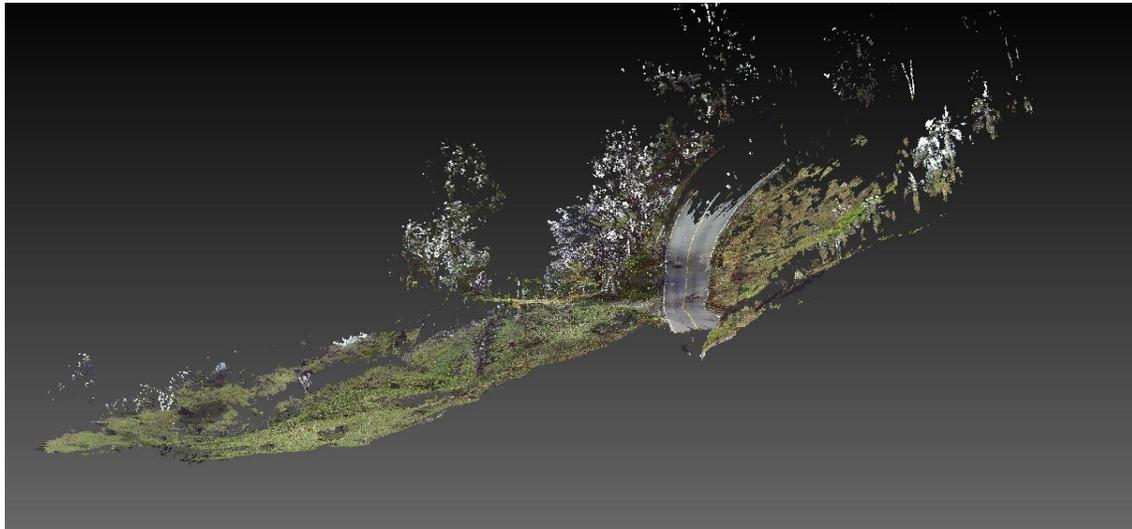


Figura 91. Detalle de ubicación de equipo en campo “armadas” Fuente: Elaboración Propia, Software: Cloud Compare.

5.8 Imágenes del primer monitoreo realizado en el sitio de estudio.

A continuación se presentan las primeras imágenes resultantes de digitalizar modelos tras hacer levantamiento con el equipo LiDAR, se pueden observar los cambios de nivel, la vegetación grande (como árboles y arbustos), la carretera que comunica a Medellín con San Pedro, las obras de drenaje observadas en campo y en las fotografías de capítulos anteriores.

Se puede observar la pendiente del terreno, así como las dimensiones transversales de la calzada existente, también se observar y medir la altura del talud, y demás dimensiones ya establecidas en el capítulo anterior.



Digitalizado 1. Empalme de los diferentes escaneos, modelo digital vista desde oriente hacia occidente. Fuente: Propia.

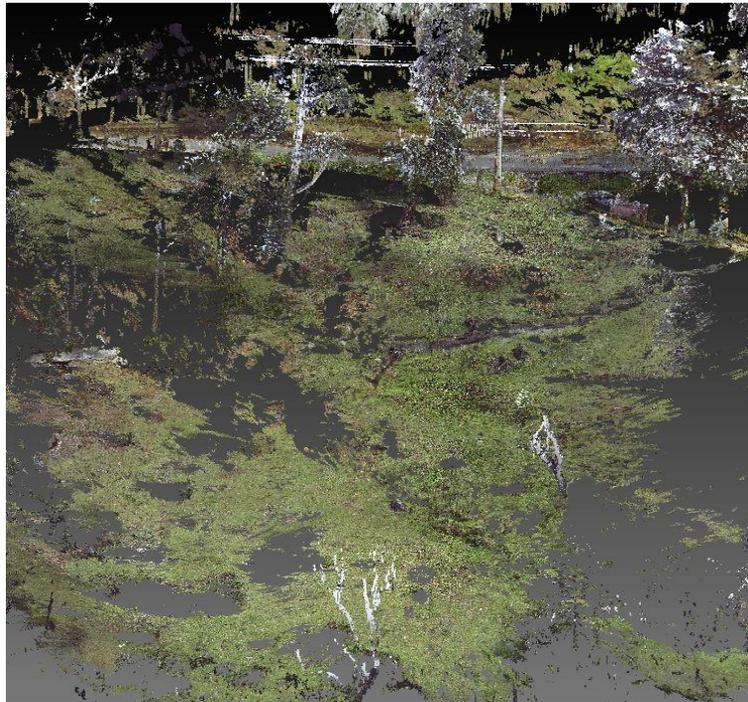


Figura 92. Empalme de los diferentes escaneos, modelo digital vista desde norte a sur. Fuente: Propia.

Se observan las obras de drenaje, la vía principal los cambios en la topografía del sitio de estudio, y demás dimensiones ya establecidas en el capítulo anterior.

Estos modelos digitales deben ser “limpiados” donde se remueve vegetación y demás elementos que impiden tener una claridad de la superficie del terreno, así como disminuir el número de puntos por escaneo para que el volumen de la información a manejar no sea exagerado.

Se elimina de cada escaneo en una fase llamada fase de limpieza;

- Vegetación grande; arboles, arbusto y cobertura vegetal excesiva, de tal forma que no se altere la superficie del deslizamiento, existe la vegetación pequeña como pasto lo cual no puede ser “limpiada” ya que hace parte de la superficie del deslizamiento.
- Elementos que no constituyen vegetación; poste y redes de comunicación, personas, vehículos, animales, estos elementos que no contribuyen con el análisis de la información y pueden generar falsas superficies o falsos desplazamientos.

Cuando se tiene la superficie limpia, se tiene una imagen digitalizada de todo el deslizamiento, donde lo que más importa es la claridad de la superficie.

Las zonas oscuras, corresponde a zonas sin información, donde no fue posible la toma de puntos con el equipo, o donde había presencia de vegetación grande; como arbustos o árboles. Es importante resaltar que se tiene una buena superficie digitalizada del deslizamiento, y con base a estos puntos, en el siguiente capítulo se determinaran desplazamientos de la masa comparando los tres escáneres realizados en diferentes fechas del año.

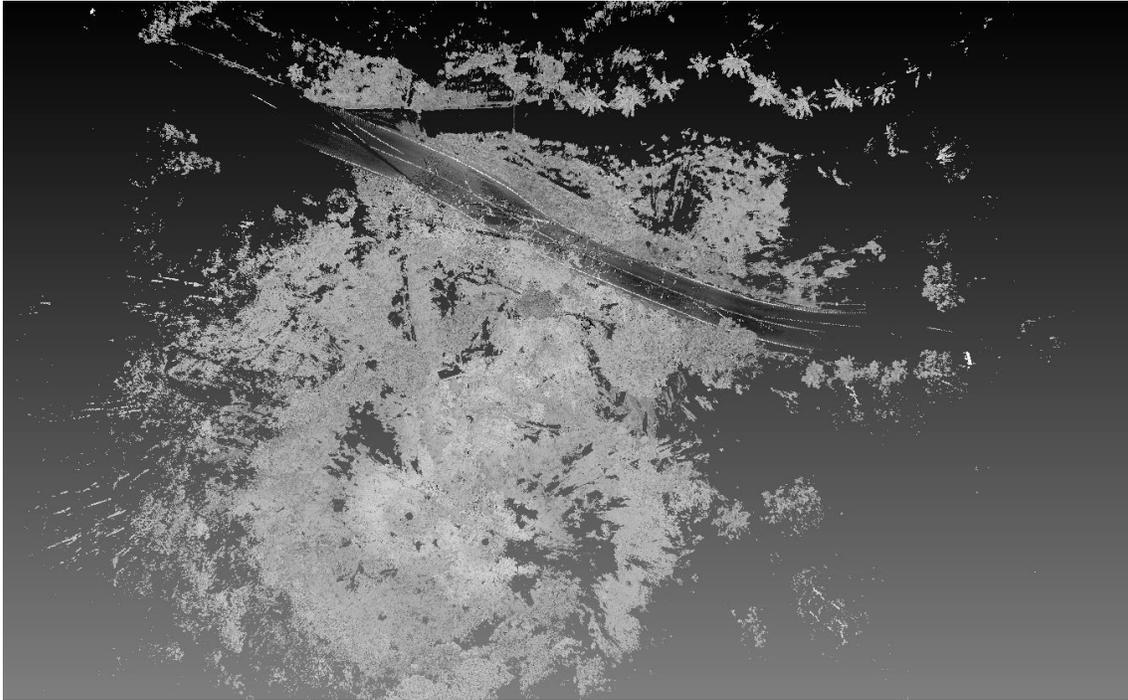


Figura 93. Modelo digital de superficie antes de proceso “limpiar”. Fuente: Propia.

Capítulo VI

Procesamiento y Resultados

A continuación se presenta el procesamiento de la información de campo y el resultado del monitoreo realizado al sitio de estudio, incluyendo la modelación del talud y el cálculo de los factores de seguridad, el día 14 de noviembre del año 2015 se ubicó el sitio, visita en la cual se realizaron tomas fotográficas y anotaciones del lugar.

El primer escaneo en campo, llamado ESCANEO 1, se realizó el 23 de Enero del 2016, este escaneo se toma como modelo topográfico base; superficie inicial del sitio y punto de partida para el monitoreo, de este escaneo, los desplazamientos serán medidos comparando los ESCANEOS 2 Y 3 con el ESCANEO 1.

El segundo escaneo llamado ESCANEO 2, se realizó el 09 de Abril del mismo año, meses después de atravesar el periodo seco (fenómeno de El Niño) por cual atravesó el país además se toma la decisión de hacer este escaneo únicamente hasta este mes, ya que se realizaron visitas en las cuales no se evidencio ningún cambio en la superficie del terreno.

El tercer escaneo denominado ESCANEO 3, fue realizado el 27 de Junio, tras varios periodos lluviosos en la ciudad de Medellín, los cuales causaron evidentes cambios en la superficie del deslizamiento, el mes de Junio fue un mes de lluvias constantes y conveniente para que se puedan mediar desplazamientos en la superficie del terreno.

6.1 Topografía del talud

El escaneo de la superficie permite generar de una manera rápida y muy precisa un plano topográfico del sitio, a continuación se presenta el plano topográfico resultante tras el análisis de la información de los tres escaneos realizados. Estos planos serán presentados en físico donde podrán ser observados con mayor detalle.

6.1.1 Plano topográfico ESCANE0 1:

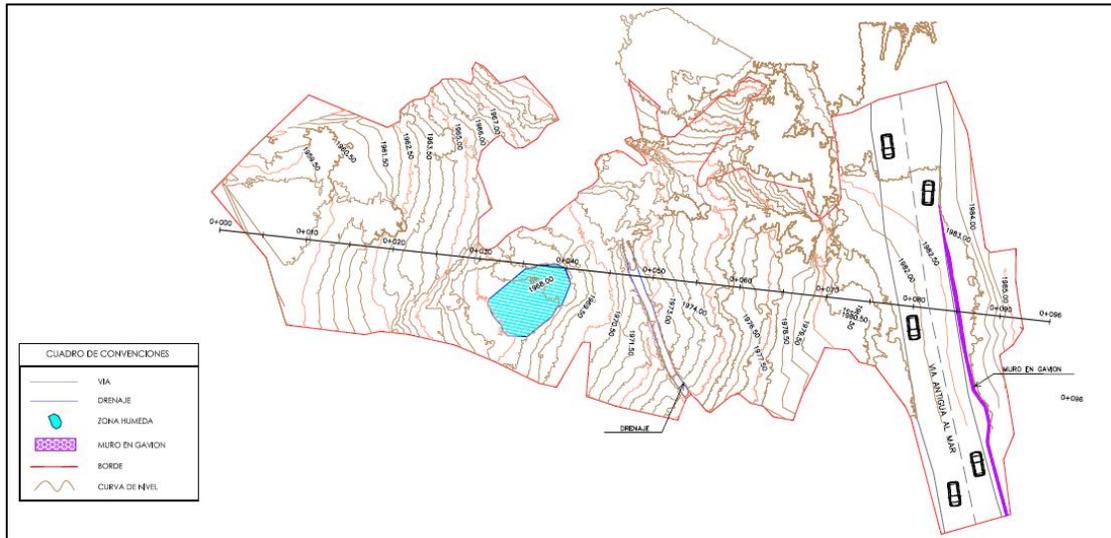


Figura 94. Plano topográfico ESCANE0 1. PLANO TOPOGRAFICO BASE Fuente: Elaboración propia.

6.1.2 Plano topográfico ESCANE0 2:

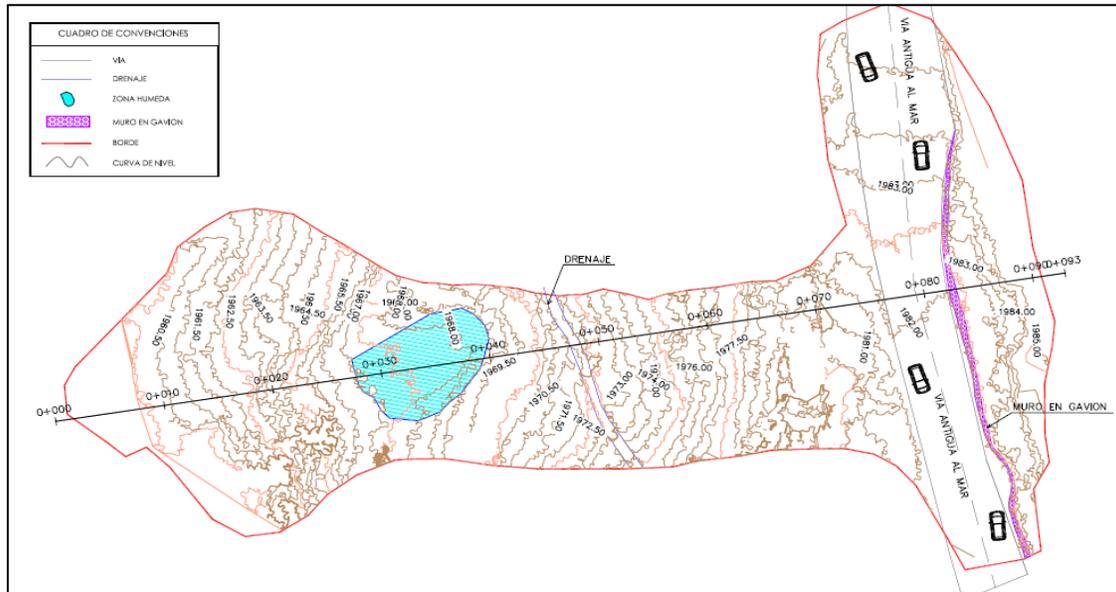


Figura 95. Plano topográfico ESCANE0 2. Fuente: Elaboración propia.

6.1.3 Plano topográfico ESCANEEO 3:

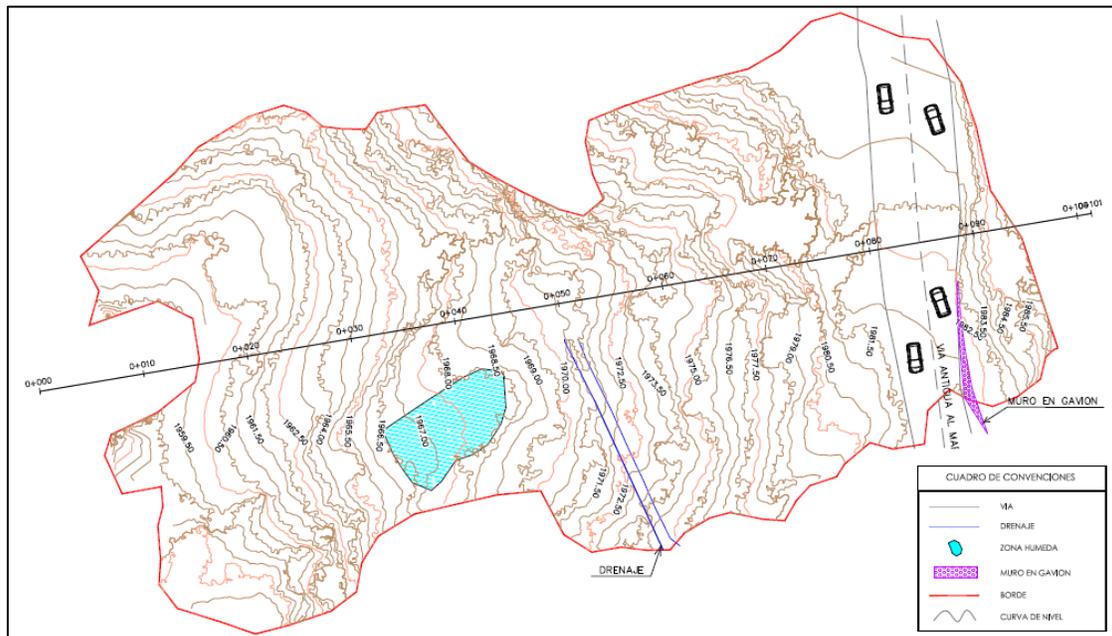


Figura 96. Plano topográfico ESCANEEO 3. Fuente: elaboración propia.

6.1.4 Comparación de perfiles topográficos

A continuación se comparan los perfiles topográficos resultantes de los tres escaneos, con el objeto de establecer diferencias importantes en la superficie del terreno desde el análisis de información topográfica en el caso de no contar con un software de comparación de nubes de puntos (Cloud Compare), de cada plano topográfico anteriormente mostrado, se importan las cotas y las abscisas, posteriormente se genera un perfil de cada plano.

Estos perfiles son mostrados en un mismo plano perfil, el perfil correspondiente al escaneo 1 se muestra de color rojo, el perfil correspondiente al escaneo 2 se muestra de color azul, y el perfil correspondiente al escaneo 3 se muestra de color gris.

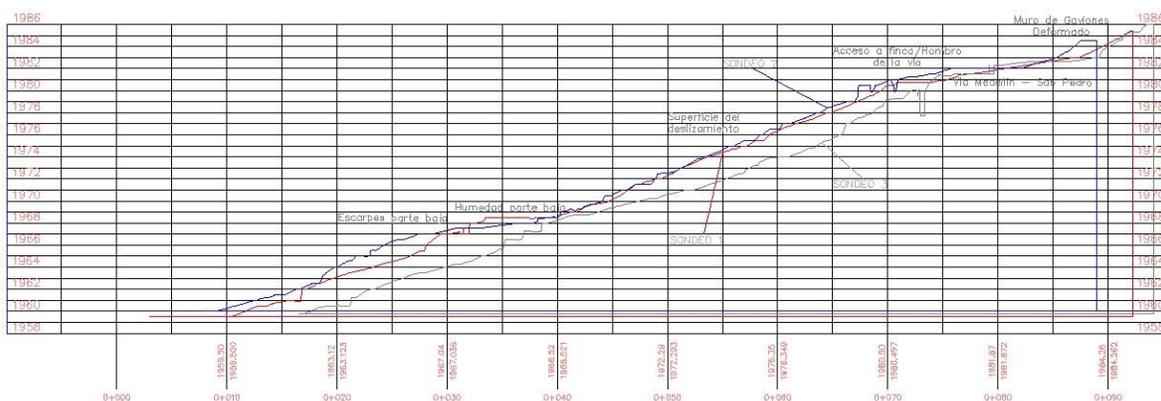


Figura 97. Comparación de perfiles topográficos entre escaneos 1, 2 y 3, empleando ACAD. Fuente: Elaboración Propia.

Se pueden observar diferencias significativas de la superficie del deslizamiento en la zona central y zona inferior (sur), las más notorios e importantes son los que se presentan en la zona inferior, donde se puede observar cambios en la superficie debido al movimiento constante y presente, es importante resaltar que existe un tiempo desde que se realizó el escaneo 1 y el escaneo 2 de 6 meses, tiempo que permitió deformaciones considerables en la superficie del deslizamiento de tipo reptacional.

A pesar de que los perfiles no fueron tomados en los mismos puntos entre los escaneos, si se encuentran sobre la superficie del deslizamiento y no difieren de distancias mayores a 1,50 metros en sentido horizontal.

6.2 Modelación del talud:

Con la información recopilada en campo, se realiza el modelamiento del talud en el sitio de estudio, donde se determinarán las posibles superficies de falla del movimiento, y posteriormente el volumen. Basándose en la información recopilada de los capítulos anteriores se conoce el tipo de movimiento presente en el talud, el depósito del suelo, las dimensiones del deslizamiento y la topografía del sitio.

6.2.1 Tipo de movimiento:

En el sitio de estudio está ocurriendo un movimiento de tipo reptación, el cual se manifiesta como un desplazamiento muy lento en la superficie del terreno, el talud presenta una pendiente moderada con cobertura vegetal, las señales antes descritas dan una idea de la baja velocidad del movimiento.

6.2.2 Deposito

El tipo de suelo presente en el sitio de estudio es un suelo tipo coluvión, de matriz arcillosa y limosa, el cual se encuentra susceptible a los cambios de humedad y temperatura, estos suelos son producto de procesos residuales debido a las condiciones topográficas e hidrográficas, así como también a las condiciones geológicas de la zona.

6.2.3 Dimensiones del deslizamiento

Longitud de la masa deslizada Ld: 94 metros, tomados desde los gaviones en el costado norte de la carretera existente, y hasta la parte baja del deslizamiento objeto del estudio.

Ancho de la masa desplazada Wd: 40 metros.

Ancho de la superficie de falla Wr: 53 metros, tomados desde el flanco occidental y hasta el flanco oriental.

Longitud de la superficie de falla Lr: 80 metros.

Profundidad de la masa desplazada Dd y Profundidad de la superficie de falla Dr: los espesores del material coluvio, su resistencia incrementa con la profundidad. Las posibles profundidades de contacto (Dr) entre los materiales están entre los 15 y los 30 metros.

Longitud total L: 114 metros.

6.2.4 Topografía del sitio

Se toma como base de topografía el plano topográfico resultante del ESCANEO 1, los cuales se encuentran en el sub título 1 de este numeral.

6.2.5 Empleo de software de modelación

Para modelar el talud en 2D y determinar la potencial superficie de falla, se emplea el programa de modelación y determinación de los factores de seguridad Slide, del fabricante RockScience, donde se toma el perfil topográfico base del ESCANEO 1 como perfil del talud.

Las propiedades a emplear (Angulo de fricción, cohesión y peso unitario) de los materiales son tomados de:

“Aplicação de Métodos Probabilísticos na Previsão Espacial de Escorregamentos Deflagrados por Chuvas – Estudio de caso: Pajarito, Medellín, Colombia, autores: Eduardo Montoya Botero, Hernán Eduardo Martínez Carvajal, Edwin Fabián García Aristizábal”, quienes presentaron una publicación en la 15th conferencia panamericana de mecánica de suelos e ingeniería geotécnica, Buenos Aires – Argentina en Noviembre de 2015, trabajo investigativo en la zona de Pajarito a 500 metros del sitio de estudio.

Tabla 16. Parámetros para modelación de talud.

Parámetro	C´(Kpa)	ϕ'	γ (Kpa)
Valor medio	6	20	2.1 Kpa

Fuente: Aplicação de Métodos Probabilísticos na Previsão Espacial de Escorregamentos Deflagrados por Chuvas – Estudio de caso: Pajarito, Medellín, Colombia.

		REGISTRO DE PERFORACION DE SONDEO			CODIGO DEL PROYECTO:		Código: D-045-07	
SERVICIOS DE INGENIERIA					FECHA DE EJECUCION:		Fecha: 29-06-2004	
					VERSION:		Versión: 01	
PROYECTO:					COORDENADAS:		NORTE: 8°17'47"	
Ubicación:							OESTE: 75°36'33"	
SONDEO NUMERO:					PERFORADOR:			
SS6A-1								
MUESTRA	PROFUNDIDAD		TIPO DE MUESTRA	MUESTROS (PT. VALORES)			DESCRIPCION MUESTRA	
	DE	A		35	30	45		
1	0,50	1,00	SS	3	4	4	LIMO DE BAJA COMPRESIBILIDAD, COLOR CAFÉ CLARO CON RAICES	
2	2,50	3,00	SS	7	5	9	LIMO DE BAJA COMPRESIBILIDAD, COLOR CAFÉ CLARO.	
3	5,50	6,00	HQ				GRAVAS CON MATRIZ ARCILLOSA COLOR CAFÉ CLARO	
4	7,50	8,00	HQ				GRAVAS CON MATRIZ ARCILLOSA COLOR CAFÉ CLARO	
5	11,50	12,00	HQ				GRAVAS CON MATRIZ ARCILLOSA Y PRESENCIA DE ARENAS, COLOR CAFÉ CLARO	
6	13,50	14,00	HQ				ARENE GRUESA CON PRESENCIA DE GRAVAS	

PROF NIVEL FREATICO: 4 METROS

PERFORADOR: _____ REVISÓ: _____

Figura 98. Registro de Perforación. Fuente: HVM Ingenieria, (2004) Registro antiguo de campo, sondeo zona Pajarito.

Para la modelacion se emplea el metodo de analisis de Morgenstern-Price. Se emplea un registro de campo, realizado en el año 2004, a aproximadamente 400 metros del sitio inestable, teniendo en cuenta que los depositos existentes en la zona son comunes se puede relacionar dicho sondeo con la profundidad de la superficie potencial de falla.

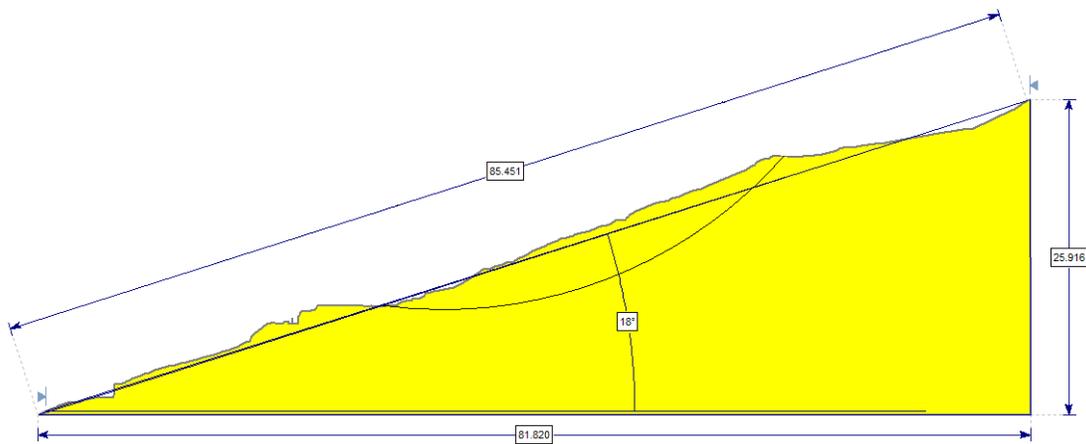


Figura 99. Modelo de superficie topográfica en Slide, dimensiones geométricas. Fuente: Elaboración Propia. Software Slide.

Empleando la información antes mencionada, se importa del plano topografía resultante de ESCANEO 1, la superficie topografía del sitio de estudio al software Slide, y se asignan materiales y demás propiedades antes de su modelación.

A continuación se muestra el Factor de Seguridad resultante de esta modelación en condición estática y sin presencia del nivel freático.

El factor de seguridad más bajo determinado por el software es de 1.35, la norma NSR-10, establece que para la estabilidad de taludes en condición estática, se debe cumplir con un F.S. mínimo de 1.5, por consiguiente el talud es potencialmente inestable empleando el modelo, condición que se está cumpliendo en la actualidad, ya que el talud no es estable; presenta un movimiento lento (reptación) y deformaciones en su superficie así, como afectación a estructuras presentes sobre el cuerpo del deslizamiento.

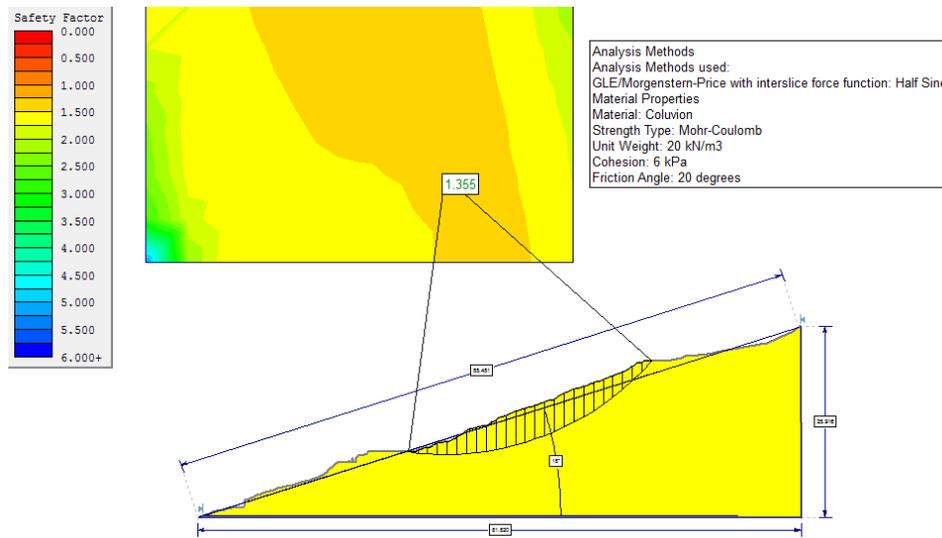


Figura 100. Modelo de superficie topográfica en Slide, condición estática, determinación del FS. Fuente: Elaboracion Propia. Software Slide.

La superficie de falla potencial resultante de esta modelacion se encuentra desde la banca de la via hasta la zona donde existe humedad, adedeionalmente, no muestra ser una superficie de falla profunda.

A continuación se determina el F.S en condición más crítica; con fuerza de aceleración de sismo y presencia de nivel freático, por norma, la aceleración máxima esperada en la superficie del terreno para dicha zona es de: 0.20 g.

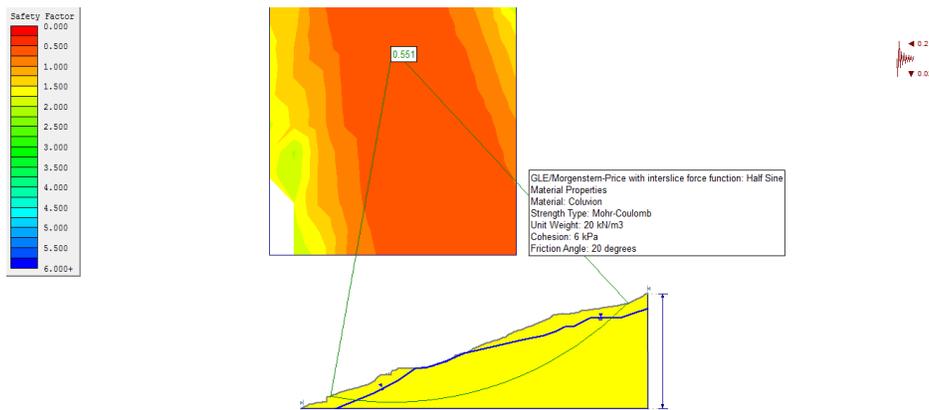


Figura 101. Modelo de superficie topográfica en Slide, condición más crítica, determinación del FS. Fuente: Elaboracion Propia. Software Slide.

El FS más bajo resultante del modelamiento del talud en condición dinámica y con nivel freático es de; 0.55, valor muy por debajo de lo mínimo exigido por la norma a cumplirse de 1.05, es evidente que el talud no es estable y presente un continuo movimiento de masa.

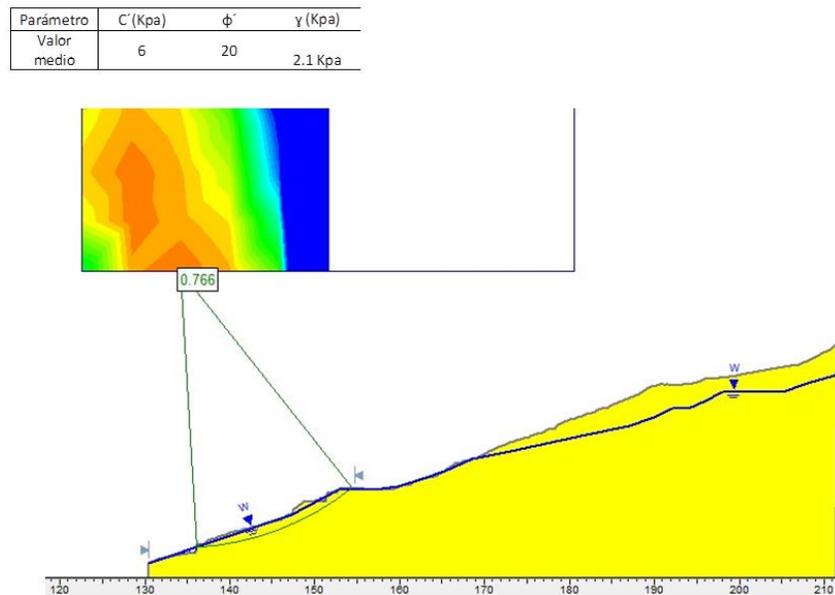


Figura 102. Medidas de superficie potencial de falla. Fuente: Elaboracion Propia. Software Slide.

Este segundo modelamiento, muestra una superficie potenciarme falla profunda, condición que más se ajusta al comportamiento de la masa de suelo presente en sitio, y a las condiciones actuales del sector.

Con la anterior información, se presenta el modelamiento del talud empleando métodos determinísticos (2D), y se determinan las posibles superficies de falla más críticas del movimiento, posteriormente el volumen aproximado del movimiento; la distancia D_r corresponde a un valor de 9.56 metros, con esta información se realiza nuevamente el cálculo del volumen de la maza deslizada, ajustando más el valor anteriormente descrito en el capítulo IV.

Tabla 17. Re cálculo del volumen de la masa desplazada.

Dr	Wr	Lr	F expansión	Volumen m3
9,56	53	80	1,15	24.407

Fuente: Elaboración Propia.

El volumen de la masa desplazada calculada y ajustada ahora tomando la profundidad de la superficie de falla como 9.56 metros es ahora 24.407 m³ de material que teóricamente se encuentra en movimiento.

6.3 Procesamiento ESCANEO 1:

Realizado el 23 de Enero del año 2016, fue el primer escaneo ejecutado al lugar donde se estableció el área de interés y la metodología a emplearse basándose en información recopilada del sitio y en observación de la zona, esta escaneo es el único realizado a color, el agregar color a los puntos induce a la creación de archivos más grandes y difíciles de manejar.

A continuación se presentan imágenes digitales de la zona resultantes del ESCANEO 1, escáner base para el monitoreo del sitio durante un periodo de 6 meses.

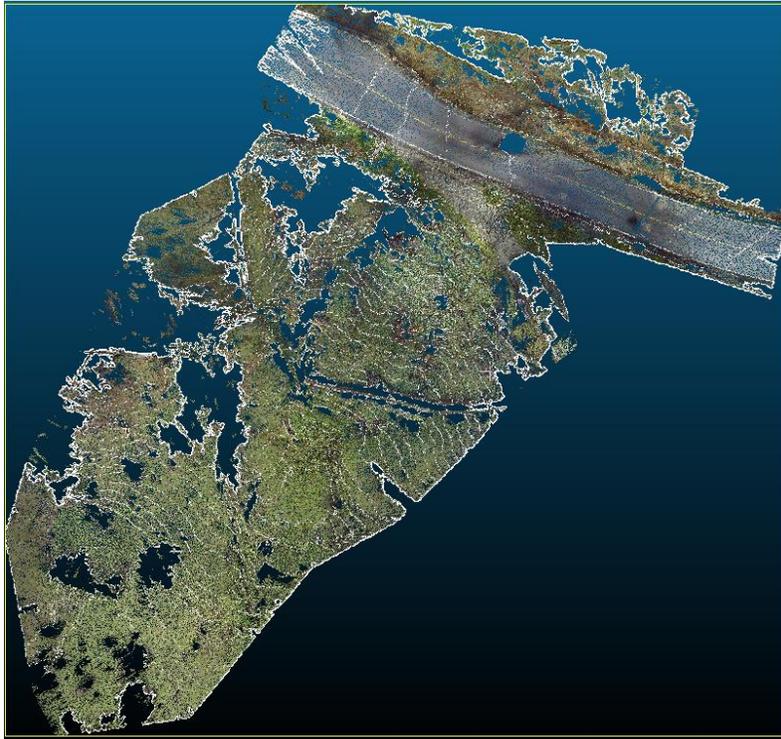


Figura 103. Modelo digital ESCANEEO 1 y curvas de nivel. Fuente: Elaboración Propia, Software; Cloud Compare.

La nube de puntos resultantes de los escáneres 2 y 3, se compara con la nube de puntos mostrada anteriormente (ESCANEEO 1), tomando como referencia puntos establecidos para determinar los desplazamientos entre las nubes de puntos. Las nubes de puntos al juntarse crean una imagen digital de la totalidad del deslizamiento, cada punto tiene una coordenada X, Y y Z, dando así una topografía con elevación real, debido al GPS incorporado del equipo.

De esta imagen digital se exportan las curvas de nivel hacia un software como el AutoCAD y se presenta un plano de la topografía del sitio, en este plano se resaltan las curvas de nivel, la obra de drenaje presente (disipador), el muro de gaviones al costado norte de la vía y la berma de la calzada costado sur, estas obras son representativas del sitio de estudio. Este plano es denominado plano topográfico base, y es un entregable del presenta trabajo de grado.

6.4 Procesamiento ESCANEO 2:

Este escaneo se realizó en el mes de abril, se unieron las nubes de puntos resultantes de las diferentes “armadas” del equipo en campo, dando como resultado una imagen digital del sitio de estudio 4 meses después de tomada la topografía base inicial.

Los puntos fueron tomados a blanco y negro para reducir el tamaño de los archivos, se puede observar la vegetación del sitio ya que no ha pasado por el proceso denominado “limpieza”.

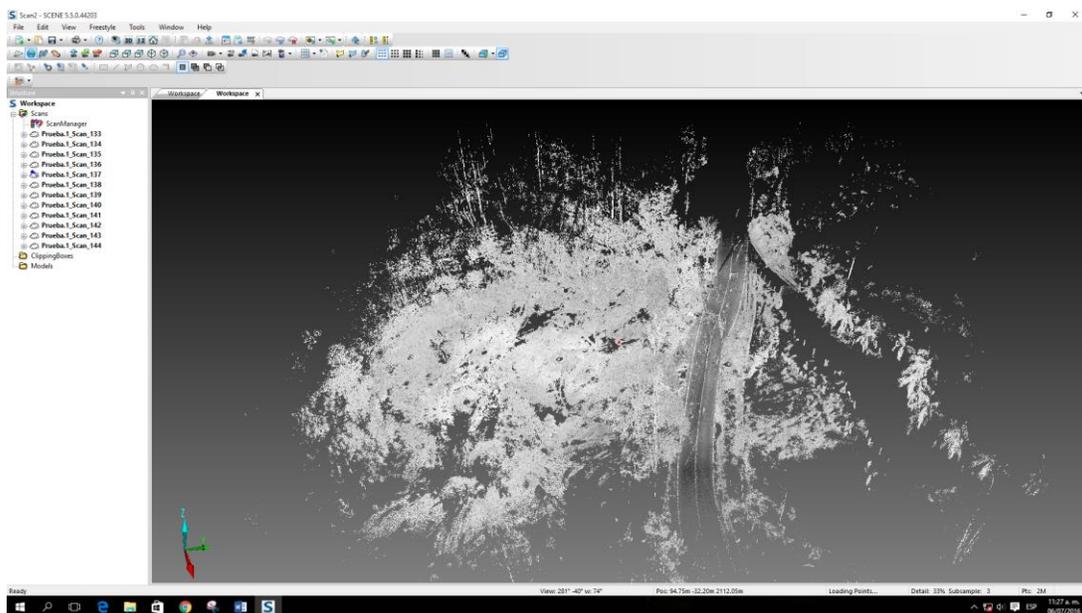


Figura 104. Modelo digital ESCANEO 2 antes de proceso “limpiar” Fuente: Propia.



Figura 105. Modelo digital ESCANEEO 2 antes de proceso "limpiar" Fuente: Propia.

Cuando se realiza la limpieza del sitio digitalmente sin llegar a eliminar accidentalmente puntos clave u obras existentes, se tiene una imagen más clara de la superficie del deslizamiento y su magnitud.

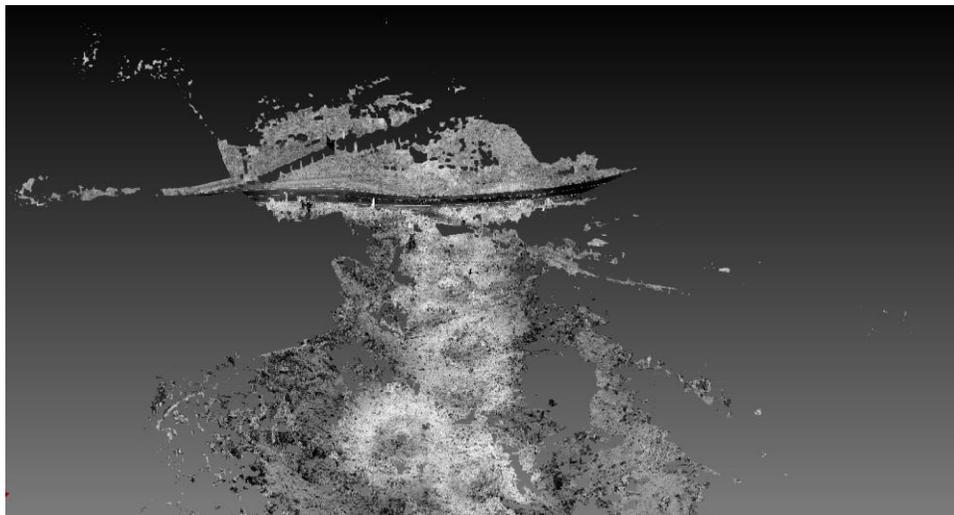


Figura 106. Modelo digital ESCANEEO 2 tras proceso "limpiar" Fuente: Elaboración Propia, software; Scene de Faro.

Cuando se tiene la imagen completa tras el proceso de limpieza, se lleva al programa Cloud Compare, de danielgm.net - EDF R&D, donde se comparan los puntos del

ESCANEEO 2 con el ESCANEEO 1, y establecer los desplazamientos presentados en la superficie del terreno tras cuatro meses.

6.4.1 Comparación de ESCANEOS 1 y ESCANEEO 2:

Se sobre ponen las imágenes digitalizadas de los dos escaneos empleando el software Cloud Compare, se determinan los desplazamientos presentados calculando la distancia entre los puntos del ESCANEEO 1 con el ECANEEO 2, siempre tomando como referencia puntos estratégicos que no se ven afectados por el movimiento reptacional. Los desplazamientos se muestran en escala de colores donde los colores más vivos representan diferencia de ubicación entre puntos, y los colores más apagados representan puntos que no han presentado desplazamientos.

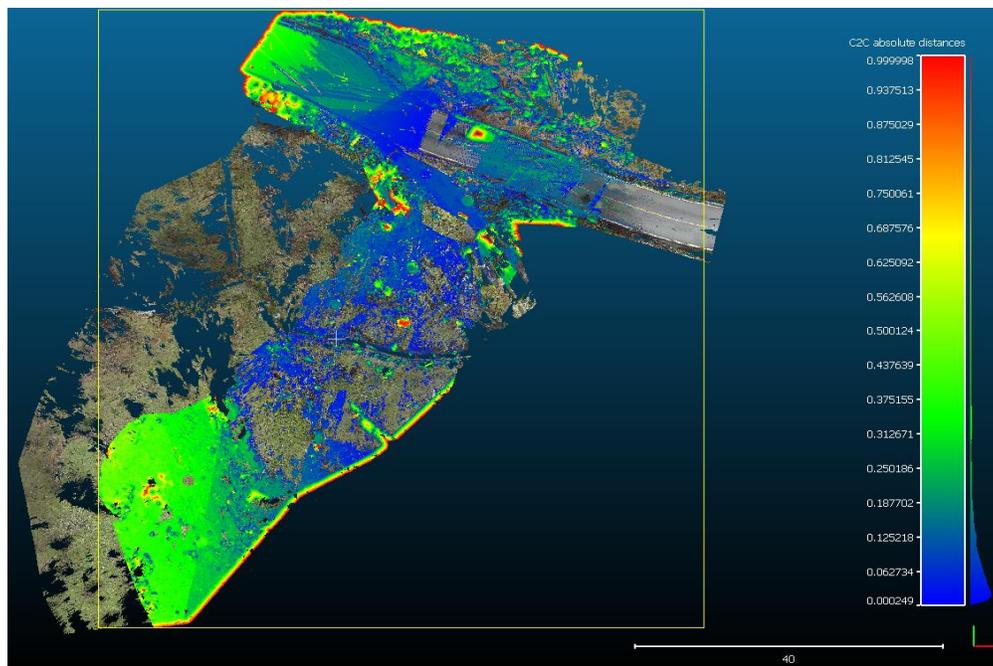


Figura 107. Comparación de nubes ESCANEEO 1 y ESCANEEO 2, escala a 1 metro.

Fuente: Elaboración Propia, Software; Cloud Compare.

Se observan desplazamientos de hasta 1 metro, pero no corresponden a las zonas del deslizamiento, estos desplazamientos de color rojo y anaranjado corresponden a puntos no existentes en los dos modelos digitales, así que debe ser descartado.

Se observan desplazamientos de hasta 0,50 metros, en la base de los muros de gaviones y en la superficie del terreno en la pata del talud (al sur del deslizamiento).

Se modifica la escala para mostrar únicamente los desplazamientos reales atribuidos a cambios en la superficie del terreno.

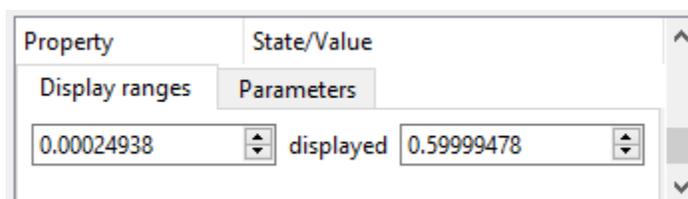


Figura 108. Opciones de escala del software, comparación de nubes ESCANEEO 1 y ESCANEEO 2, escala a 0,59 metros. Fuente: Elaboración propia.

Los desplazamientos menor a mostrar corresponden a rangos entre los 0,00024938 metros y 0,59999478 metros, rangos de alta precisión logrados con el equipo y la metodología adoptada.

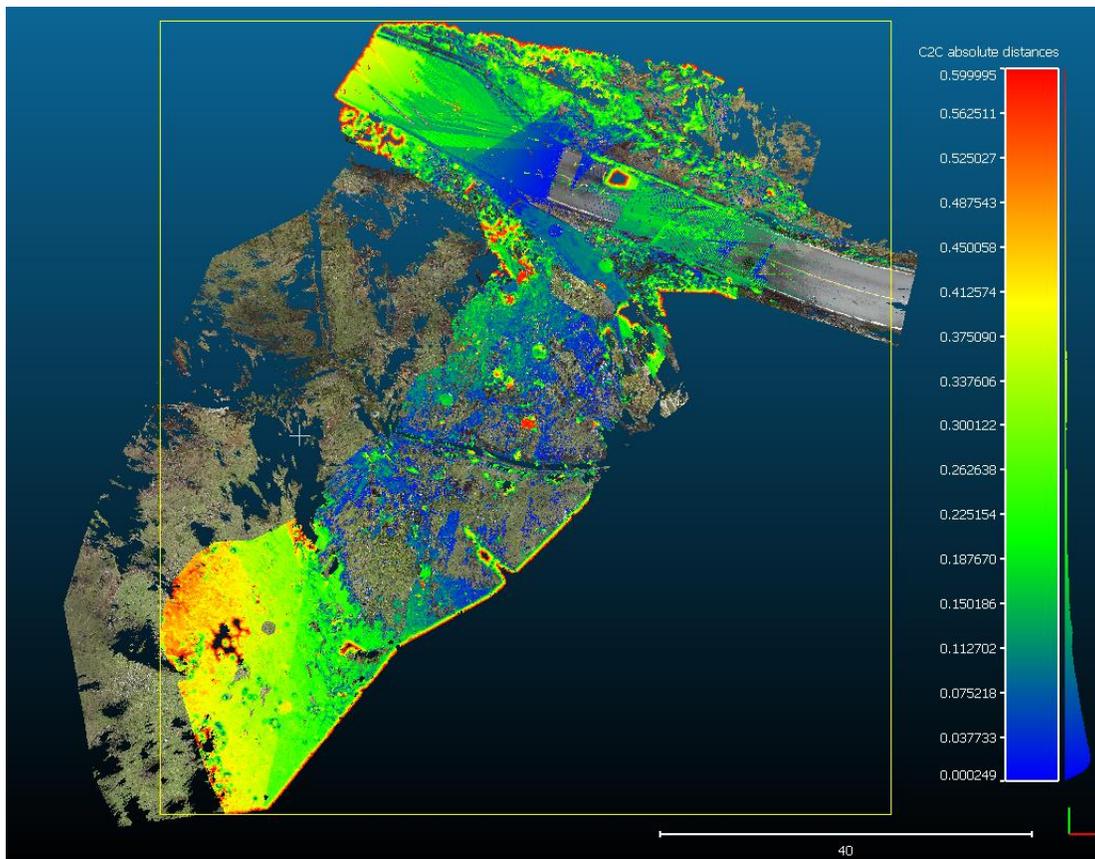


Figura 109. Comparación de nubes ESCANEEO 1 y ESCANEEO 2, escala a 0,59 metros.

Fuente: elaboración Propia, Software; Cloud Compare.

Hay que tener claro que algunos desplazamientos son atribuidos a vegetación presente en el ESCANEEO 1 y no presente en el ESCANEEO 2, así que dichas lecturas no deben ser tomadas como desplazamientos de la superficie del terreno. A continuación se presentan los desplazamientos generados en superficies de terreno atribuidas al tipo de movimiento de reptación presente en el sitio.

Nuevamente se hacen más evidentes los desplazamientos observados en la base de los muros de gaviones y en la parte sur o pata del deslizamiento. Las magnitudes de estos desplazamientos ocurridos entre Enero y Abril del presente año son:

En la base de los muros de gaviones del orden de 22 centímetros.

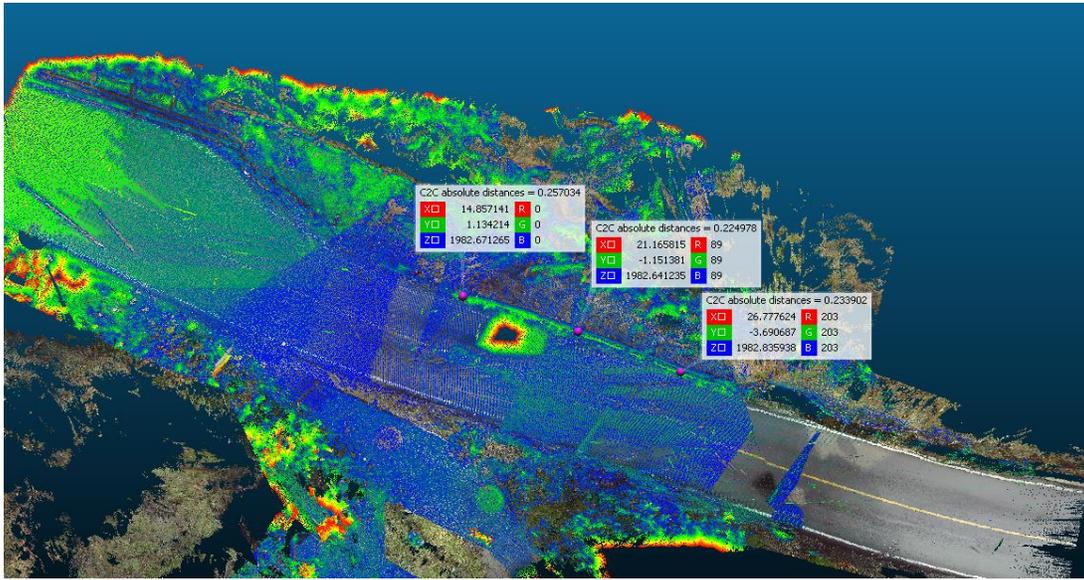


Figura 110. Lectura de desplazamientos entre ESCANE0 1 y ESCANE0 2, escala a 0,59 metros, zona superior. Fuente: elaboración Propia, Software; Cloud Compare.

En el dissipador o estructura de drenaje existente son del orden de hasta 5 centímetros.

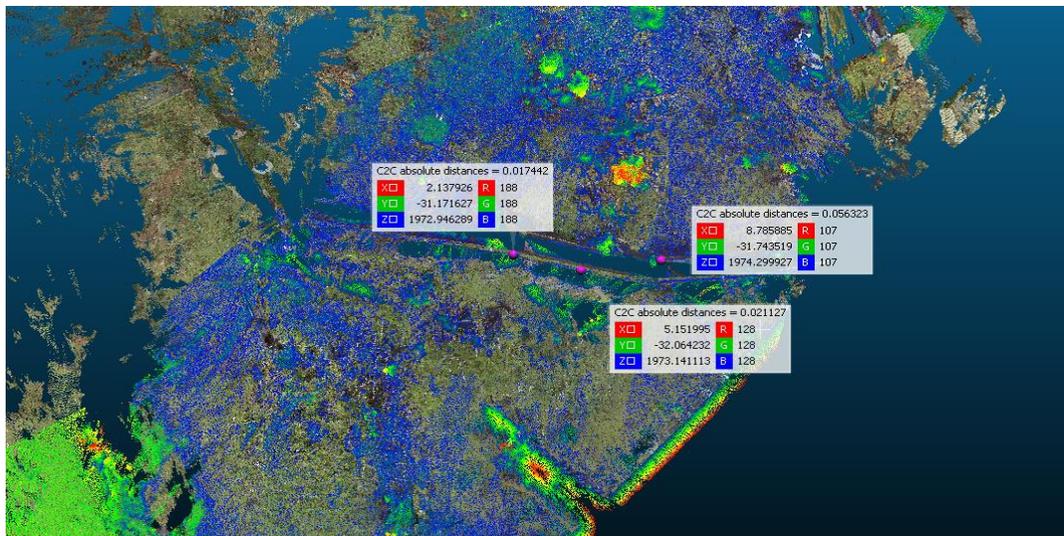


Figura 111. Lectura de desplazamientos entre ESCANE0 1 y ESCANE0 2, escala a 0,59 metros, zona central. Fuente: elaboración Propia, Software; Cloud Compare.

En la parte sur o pata del deslizamiento los desplazamientos son del orden de; 20 centímetros en el pequeño escarpe (costado derecho) y entre 26 y 33 centímetros (costado izquierdo).

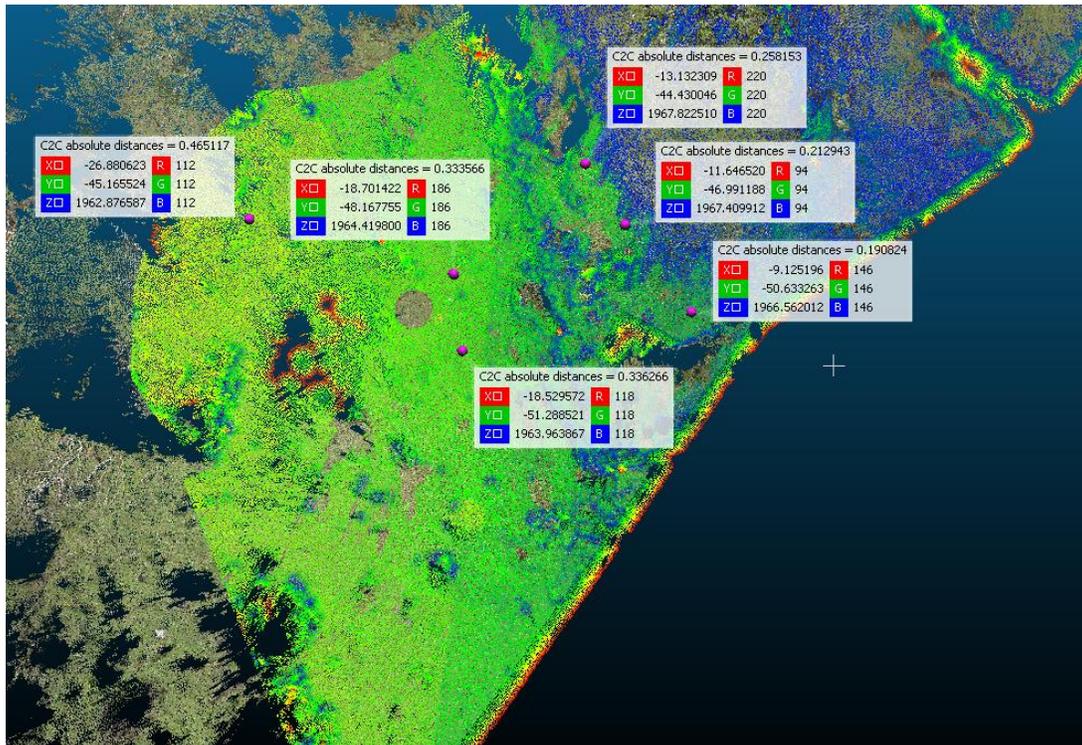


Figura 112. Lectura de desplazamientos entre ESCANEO 1 y ESCANEO 2, escala a 0,59 metros, zona inferior. Fuente: Elaboración Propia, Software; Cloud Compare.

Tras el monitoreo del sitio, se concluye que desde el mes de Enero y hasta el mes de Abril el sitio aun presenta movimientos y deformaciones superficiales atribuidas al movimiento reptacional presente, el cual no se ha frenado incluso en temporada seca, debido a la humedad presente en la zona, los materiales que componen la masa desplazada, y la acción de la gravedad, se han registrados desplazamientos en los muros de gaviones; evidentes a simple vista, en el dissipador en la parte central del deslizamiento; evidente ruptura del concreto, y en la pata del deslizamiento donde se están generando escarpes. Las magnitudes son del orden de hasta 25 centímetros en la parte superior (al norte), 7 centímetros en la parte central y 46 centímetros en la parte inferior (al sur).

6.4.1.1 Comparación de perfiles ESCANEO 1 – ESCANEO 2 empleando Cloud Compare.

Empleando el software de análisis y manejo de nubes de puntos, se comparan los perfiles determinados entre estos dos escaneos: a continuación se muestra en color rojo, la línea correspondiente a la longitud de donde se desea realizar el perfil de la superficie, se toma como base el ESCANEO 1.

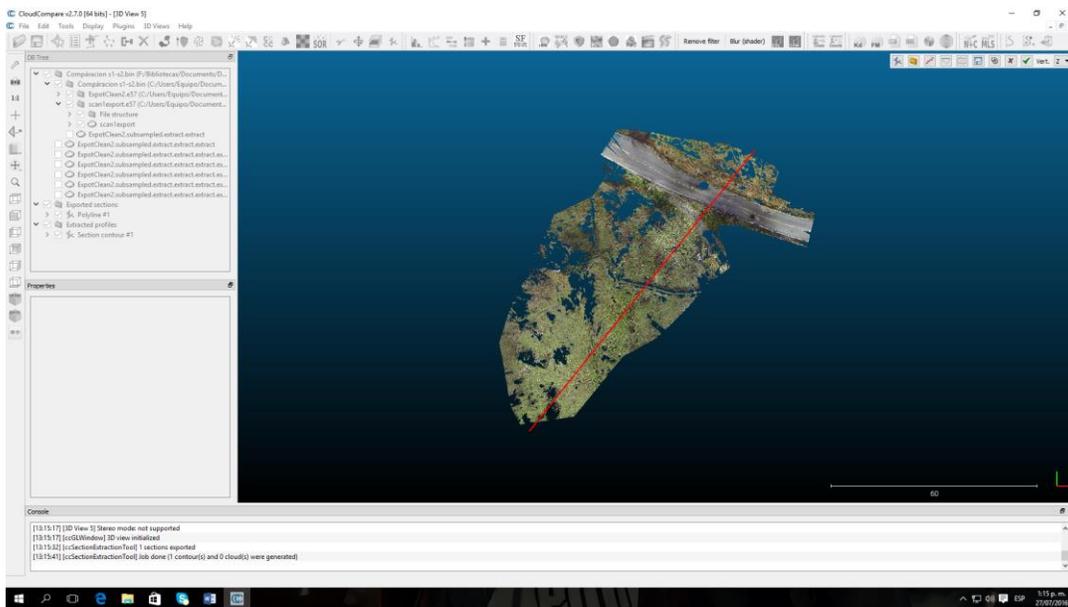


Figura 113. Ubicación del perfil base sobre modelo digital ESCANEO 1. Fuente: Elaboración Propia, Software; Cloud Compare.

Se repite el procedimiento con el modelo digital del ESCANEO 2 y se generar los dos perfiles, el perfil de color blanco corresponde a la superficie base (ESCANEO 1) Enero del año 2016 y el perfil de color verde corresponde a la superficie del terreno en el mes de Abril del año 2016.

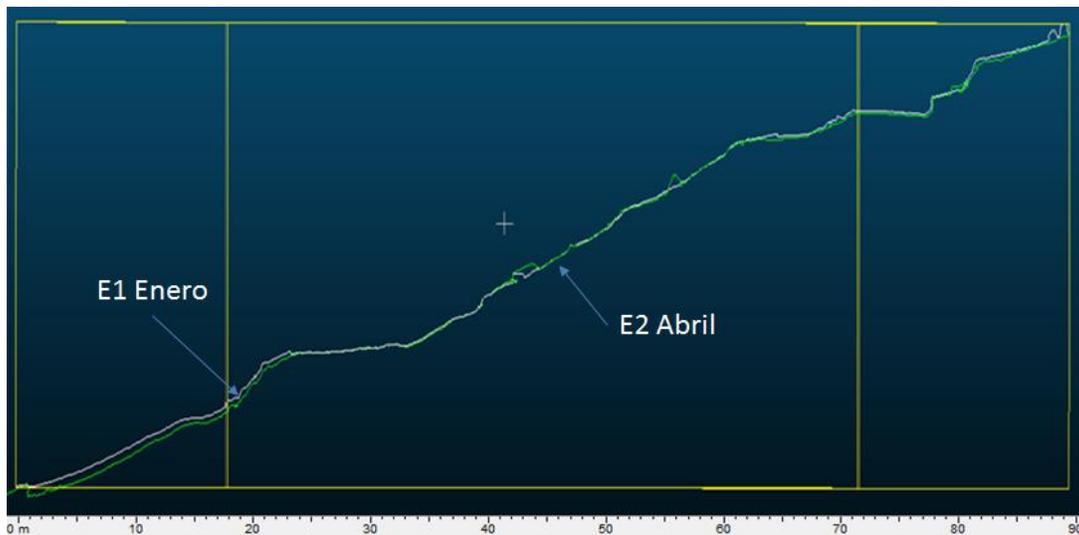


Figura 114. Comparación de perfiles, desplazamientos entre los meses de Enero y Abril del año 2016. Fuente: Elaboración Propia, Software; Cloud Compare.

El comparar los dos perfiles mostrados anteriormente, se confirma que ha existido un desplazamiento de la superficie del talud, causando movimientos y deformaciones superficiales atribuidas al movimiento reptacional presente, las más notorias están ocurriendo en la zona alta del talud (muro de gaviones y vía) donde se observan pequeñas diferencias de altura,

Los desplazamientos que más llaman la atención, son los que están ocurriendo en la parte baja del talud (sur) desde la zona húmeda hasta la pata del talud, se intuye que esto ocurre ya que el deslizamiento principal está generando movimientos de masas y acumulaciones de material en la pata del deslizamiento, los cuales corresponden a las masas deformadas y acumuladas que se observan en zonas aledañas.

6.5 Procesamiento ESCANEO 3:

Este escaneo se realizó en el mes de junio, se unieron las nubes de puntos resultantes de las diferentes “armadas” del equipo en campo, dando como resultado una imagen digital del sitio de estudio 6 meses después de tomada la topografía base inicial.

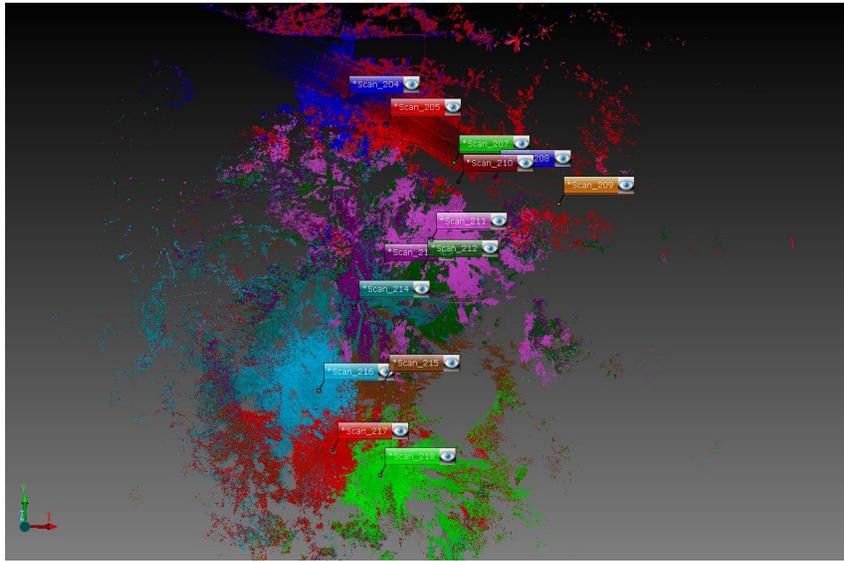


Figura 115. Ubicación del equipo terrestre. Fuente: Elaboración Propia, software; Scene de Faro.

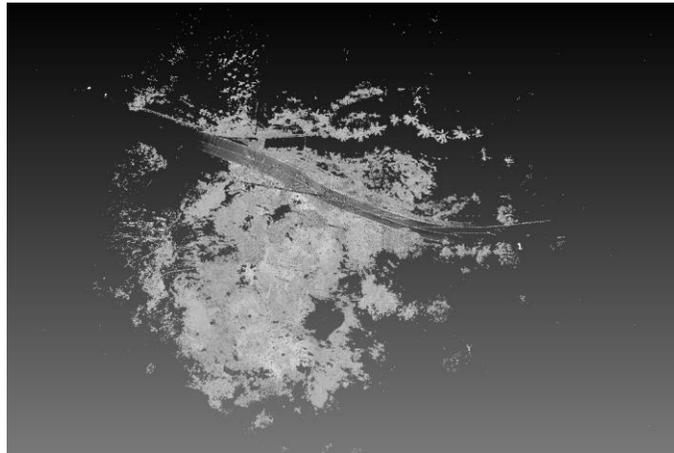


Figura 116. Modelo digital ESCANEO 3 antes de proceso “limpiar”. Fuente: Elaboración Propia, software; Scene de Faro.

Los puntos fueron tomados a blanco y negro para reducir el tamaño de los archivos, se puede observar la vegetación del sitio ya que no ha pasado por el proceso denominado “limpieza”.

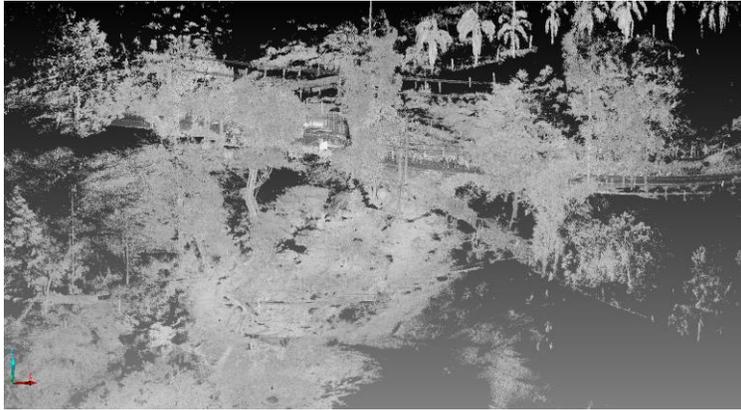


Figura 117. Modelo digital ESCANEO 3 antes de proceso “limpiar” Fuente: Elaboración Propia, software; Scene de Faro.

Cuando se realiza la limpieza del sitio digitalmente sin llegar a eliminar accidentalmente puntos clave u obras existentes, se tiene una imagen más clara de la superficie del deslizamiento y su magnitud.



Figura 118. Modelo digital ESCANEO 2 tras proceso “limpiar” Fuente: Elaboración Propia, software; Scene de Faro.

Cuando se tiene la imagen completa tras el proceso de limpieza, se lleva al programa Cloud Compare, de danielgm.net - EDF R&D, donde se comparan los puntos del

ESCANEOS 3 con el ESCANEO 1, y establecer los desplazamientos sufridos en la superficie del terreno tras tres meses.

6.5.1 Comparación de ESCANEOS 1 y ESCANEOS 3:

Se sobreponen las imágenes digitalizadas de los dos escaneos empleando el software Cloud Compare, la diferencia en tiempo entre la fecha del ESCANEO 1 y el Escaneo 3, es de 6 meses, tiempo suficiente para se determinan los desplazamientos presentados calculando la distancia entre los puntos del ESCANEO 1 con el ESCANEO 3, siempre tomando como referencia puntos estratégicos que no se ven afectados por el movimiento reptacional. Los desplazamientos se muestran en escala de colores donde los colores más vivos representan diferencia de ubicación entre puntos, y los colores más apagados representan puntos que no han presentado desplazamientos.

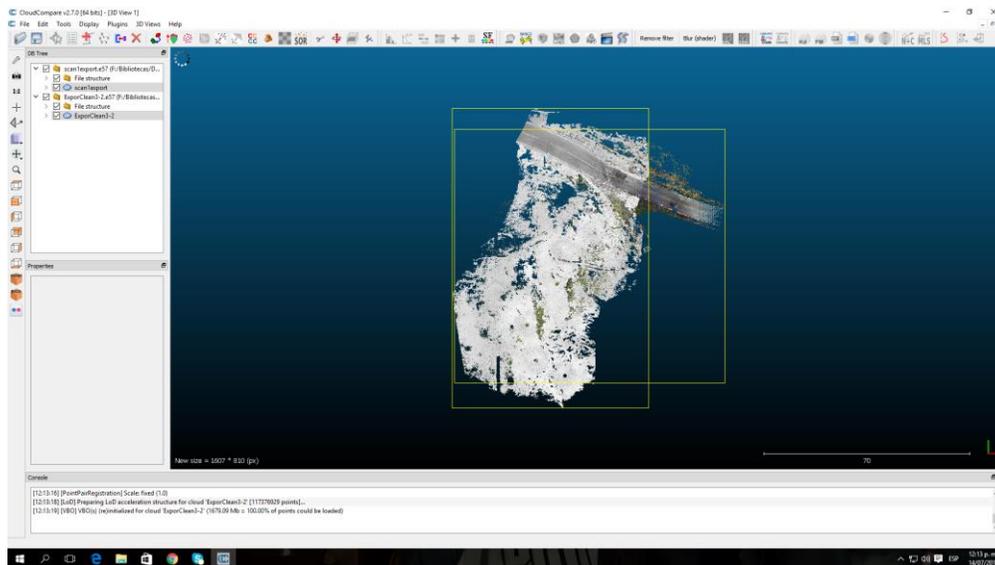


Figura 119. Comparación de nubes ESCANEO 1 y ESCANEO 3, escala a 1 metro.

Fuente: elaboración Propia, Software; Cloud Compare.

Se observan en la superficie zonas con colores que indican desplazamientos entre puntos de hasta 1.0 metro, esto debido a los cambios que ha sufrido la topografía del terreno debido a los movimientos del suelo durante estos 6 meses de monitoreo.

Se observan importantes desplazamientos de hasta 0,60 metros, en la base de los muros de gaviones, en la superficie del terreno de hasta 0,50 metros y en la pata del talud (al sur del deslizamiento) de hasta 0,99 metros.

Los desplazamientos mayores registrados y que se desean mostrar corresponden a rangos entre los 0,00024938 metros y 0,99999478 metros, rangos de alta precisión logrados con el equipo y la metodología adoptada.

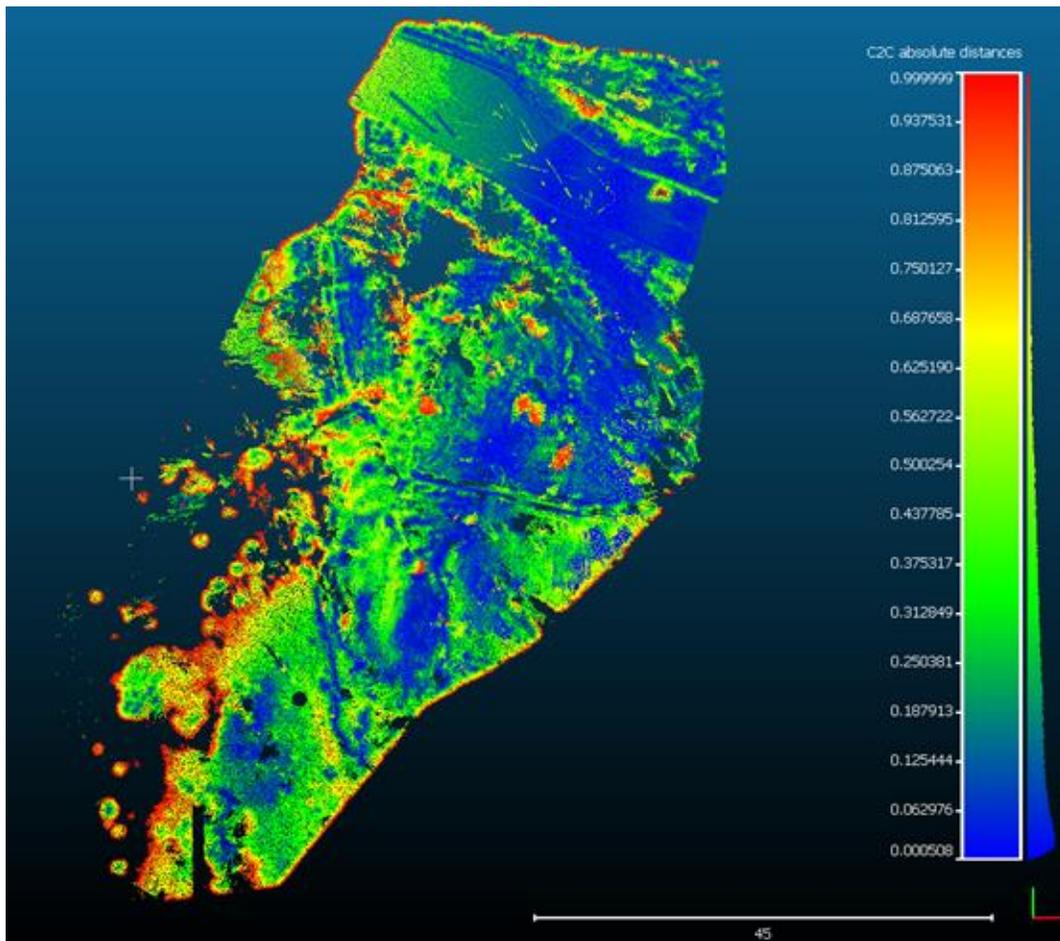


Figura 120. Desplazamientos registrados sobre superficie del deslizamiento. Fuente: elaboración Propia, Software; Cloud Compare.

Hay que tener claro que algunos desplazamientos son atribuidos a vegetación presente en el ESCANEO 1 y no presente en el ESCANEO 3, así que dichas lecturas no deben ser tomadas como desplazamientos de la superficie del terreno. A continuación se presentan

los desplazamientos generados en superficies de terreno atribuidas al tipo de movimiento de reptación presente en el sitio. Nuevamente se hacen más evidentes los desplazamientos observados en la base de los muros de gaviones y en la parte sur o pata del deslizamiento.

Las magnitudes de estos desplazamientos ocurridos entre Enero y Junio del presente año son: En la base de los muros de gaviones del orden de 40 centímetros.

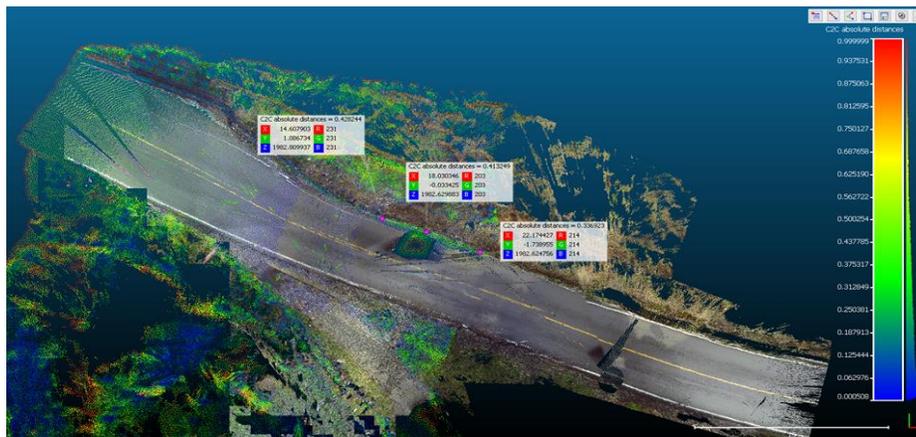


Figura 121. Lectura de desplazamientos entre ESCANE0 1 y ESCANE0 3, escala a 0,99 metros, zona superior. Fuente: elaboración Propia, Software; Cloud Compare.

En el dissipador o estructura de drenaje existente son del orden de hasta 60 centímetros.

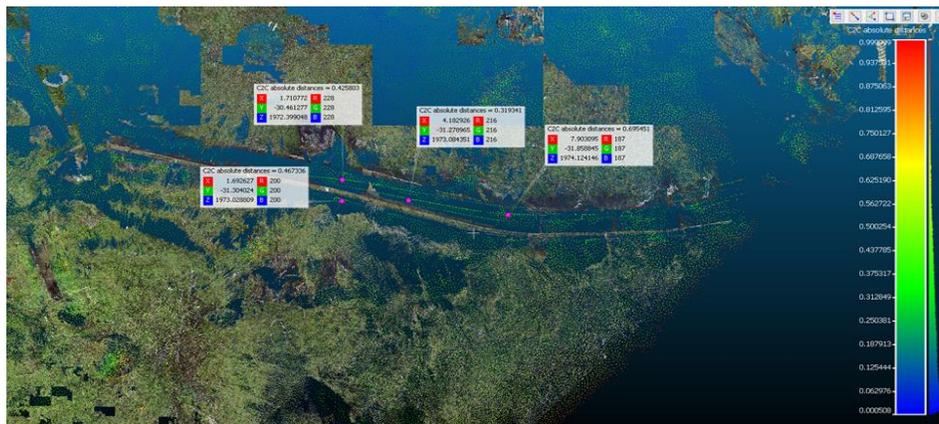


Figura 122. Lectura de desplazamientos entre ESCANE0 1 y ESCANE0 3, escala a 0,99 metros, zona central. Fuente: elaboración Propia, Software; Cloud Compare.

En la parte sur o pata del deslizamiento los desplazamientos se midieron desplazamientos de la superficie de hasta 90 centímetros (costado derecho), sin duda alguna esta zona considerada la pata del talud esta presentado importantes cambios en su superficie.

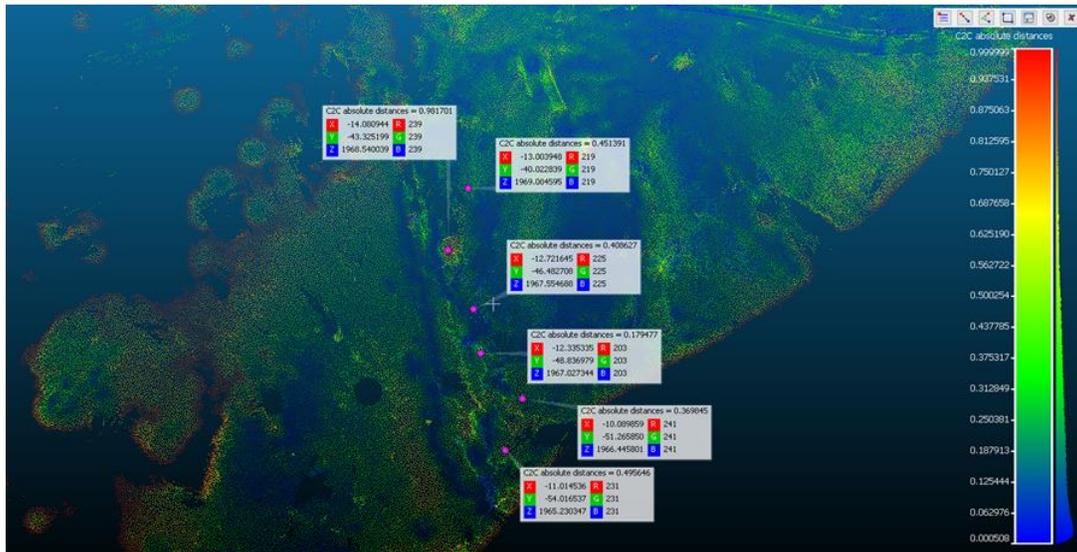


Figura 123. Lectura de desplazamientos entre ESCANEO 1 y ESCANEO 3, escala a 0,99 metros, zona inferior. Fuente: Elaboración Propia, Software; Cloud Compare.

En la parte inferior del deslizamiento zona sur, costado izquierdo, se una interesante deformación en la superficie, lugar donde se han detectado desplazamientos debidos a presente movimiento de reptación.

Magnitudes de desplazamientos de hasta 0,98 metros se han podido medir en esta zona.

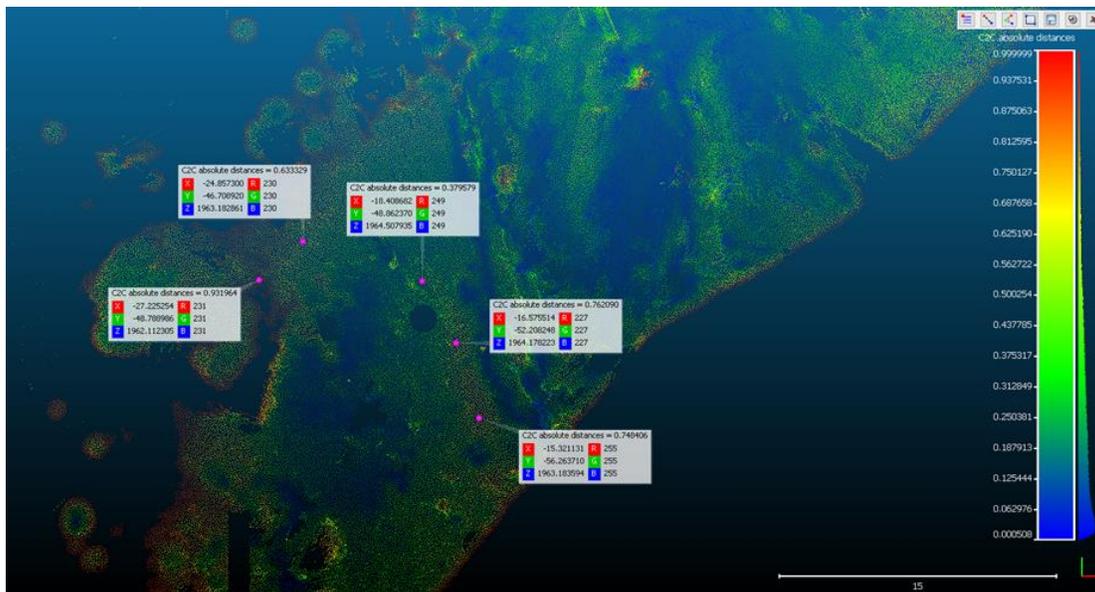


Figura 124. Lectura de desplazamientos entre ESCANE0 1 y ESCANE0 3, escala a 0,99 metros, zona inferior. Fuente: Elaboración Propia, Software; Cloud Compare.

Una vez finalizado el monitoreo del sitio, se puede establecer que existe y continua una deformación en la superficie del talud medidas entre los meses de Enero y Junio, generado por la inestabilidad de la zona que genera desplazamientos, estos desplazamientos han sido de mayor magnitud comparándolos con los desplazamientos registrados entre los meses de Enero y Abril del mismo año, aunque la gran mayoría de estos no son percibibles a simple vista, son detectados en magnitud, dirección y velocidad empleando el equipo LiDAR y la metodología empleada.

6.5.1.1 Comparación de perfiles ESCANE0 1 – ESCANE0 3 empleando Cloud Compare.

Empleando el software de análisis y manejo de nubes de puntos, se comparan los perfiles determinados entre estos dos escaneos: a continuación se muestra en color rojo, la línea correspondiente a la longitud de donde se desea realizar el perfil de la superficie, se toma como base el ESCANE0 1.

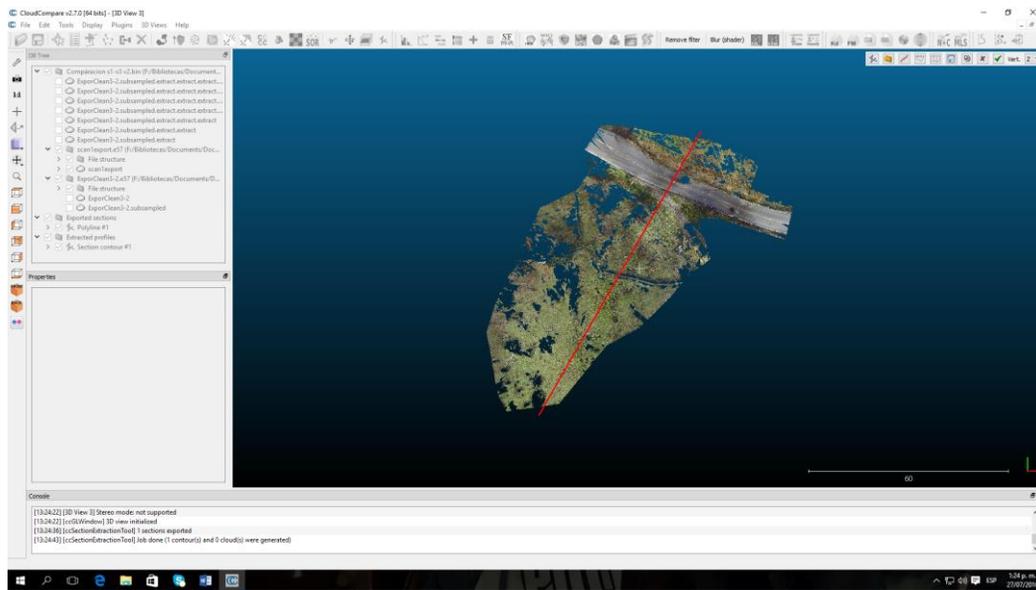


Figura 125. Ubicación del perfil base sobre modelo digital ESCANEO 1. Fuente: Elaboración Propia, Software; Cloud Compare.

Se repite el procedimiento con el modelo digital del ESCANEO 3 y se generar los dos perfiles, el perfil de color blanco corresponde a la superficie base (ESCANEO 1) Enero del año 2016 y el perfil de color verde corresponde a la superficie del terreno en el mes de Julio del año 2016.

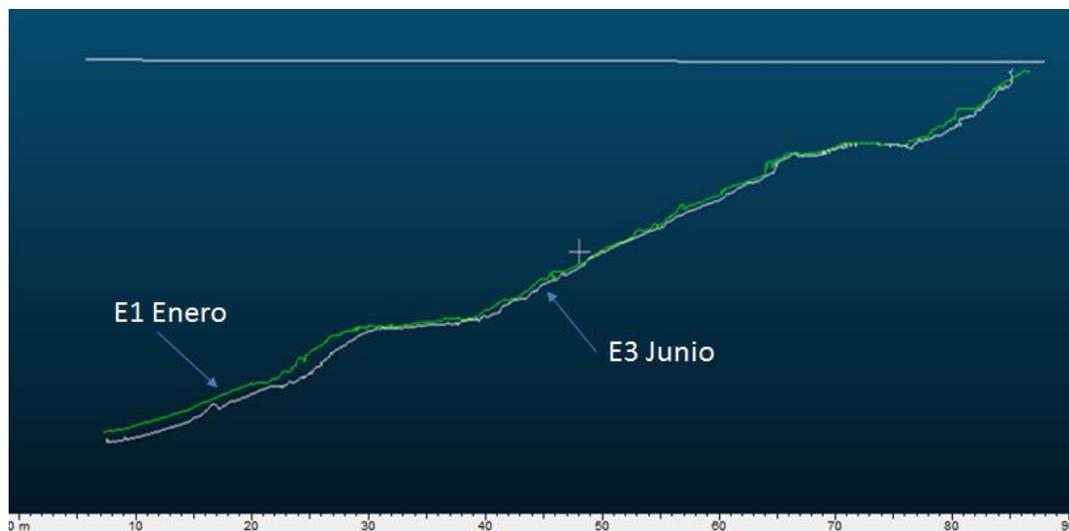


Figura 126. Comparación de perfiles, desplazamientos entre los meses de Enero y Julio del año 2016. Fuente: Elaboración Propia, Software; Cloud Compare.

El comparar los dos perfiles mostrados anteriormente, se confirma que ha existido un desplazamiento de la superficie del talud, causando movimientos y deformaciones superficiales atribuidas al movimiento reptacional presente, las más notorias siguen ocurriendo en la zona alta del talud (muro de gaviones y vía) donde se observan desplazamientos de hasta 1 metros, de la misma manera que está ocurriendo en la zona baja del deslizamiento, donde se hacen más grandes los desplazamientos entre las dos superficies.

Tras comparar los perfiles de estos dos ESCANEOS (1 y 3) se observa que se está generando deformaciones importantes de la masa de suelo correspondientes a la zona inferior del talud y zona izquierda; desde la zona humedad hacia la parte baja o pata, donde se intuye que esta acumulaciones de materiales se generan debido a la masa que se está desplazando y que a su vez, se encuentra generando inestabilidad de las masas aledañas. Este fenómeno se puede evidenciar en campo comparando la evolución del escarpe y sus desplazamientos evidentes.

6.6 Resultados Finales.

A continuación se muestran los desplazamientos promedios medidos tras el monitoreo realizado durante seis meses, es evidente que el sitio es inestable, que en la parte baja del movimiento (zona roja) se presentan los mayores desplazamientos, las condiciones de humedad, el tipo de depósito y la pendiente del lugar, generan esta condición.

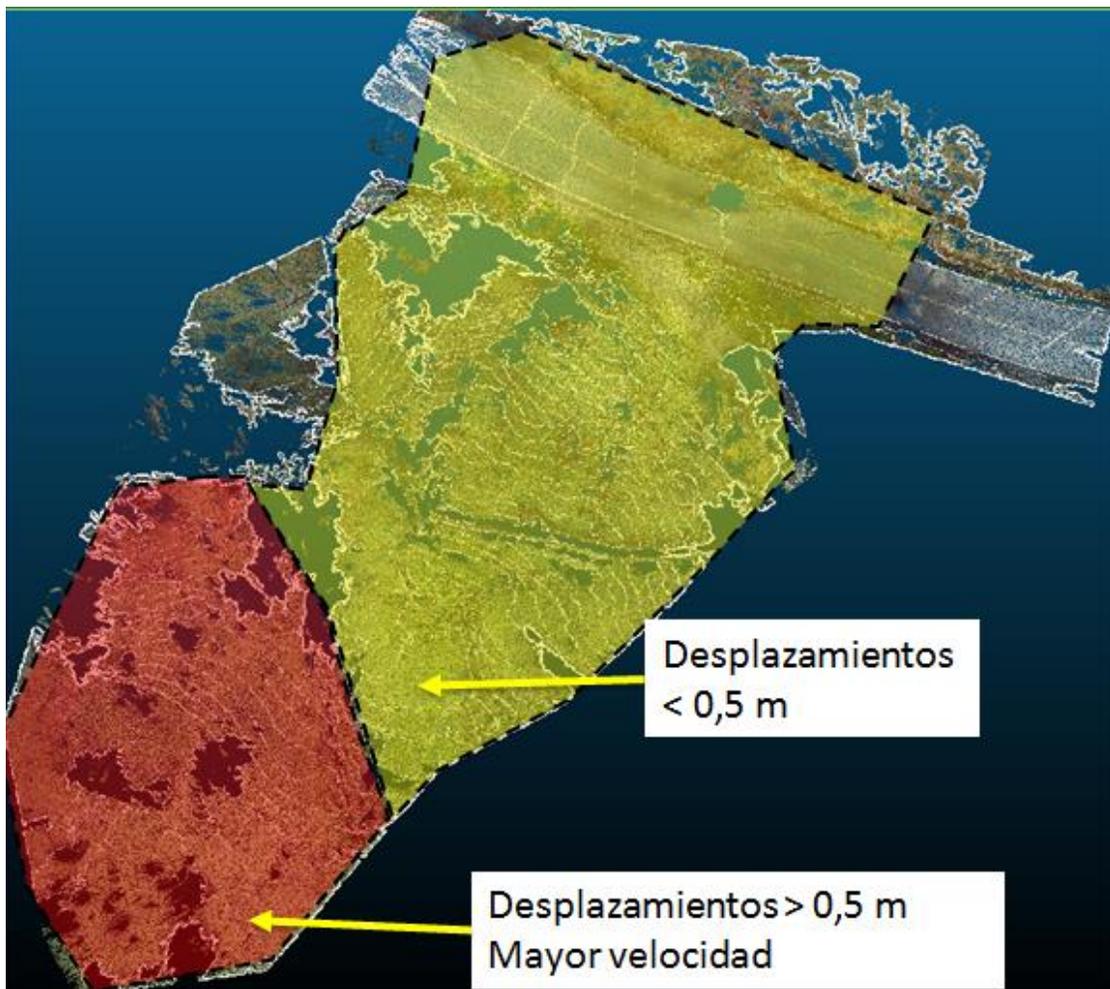


Figura 127. Resultados Generales. Fuente: Elaboración Propia.

Las condiciones hidrológicas generadas por la topografía de la zona, incrementan la inestabilidad de la zona.

7. Conclusiones

La vereda de Pajarito presenta numerosas zonas de inestabilidad, atribuidas a; las propiedades del suelo presente y a las aguas que confluyen hacia la depresión geológica que conforma el Valle de Aburra, las pendientes medias a altas de los cerros y taludes en las zonas laterales al Valle, han generado afluentes y condiciones hidrográficas particulares, así como zonas inestables con procesos de gran magnitud y extensión.

Pese a que la vereda de Pajarito esta categorizada como zona de expansión para la ciudad de Medellín, es fundamental identificar todos los sitios con problemas de estabilidad geotécnica, y controlar la propagación de edificaciones en dichas zonas, es especial referencia, a la construcción de viviendas unifamiliares, por parte de los campesinos que viven en los predios, mitigando el colapso de estas y el riesgo que representa para los vivientes.

Acorde con la información recopilada en campo, y tomando como base información existente, en el sitio de estudio está ocurriendo un movimiento de tipo reptación, el cual se manifiesta como un desplazamiento muy lento en la superficie del terreno, este desplazamiento presenta una velocidad lenta, entre 90 mm/año.

El tipo de suelo presente en el sitio de estudio, corresponde depósitos Coluviales (Qc): Material superficial constituido por una matriz limo-arcillosa clara y tonalidades oscuras, debido a la presencia abundante de suelo orgánico. Se encuentran localizados a media ladera, entre la vía que comunica a Medellín y San Pedro, sus propiedades mecánicas son muy susceptibles al cambio al entrar en contacto con el agua, su matriz hace que el material cambie su estado de consistencia y se generen deformaciones en la superficie.

El levantamiento topográfico realizado en el sitio de estudio, empleando el equipo LiDAR, fue mucho más rápido en términos de trabajo de campo y procesamiento de la información, comparado a la metodología convencional, adicional a ello, la precisión del resultante topográfico es muy superior debido al volumen de la información por escaneo

(20 millones de puntos) para 14 escaneos en el sitio, comparado con la precisión y la información que podría capturar una comisión topográfica en un tiempo prudente.

La metodología empleada durante los trabajos de campo, representa una metodología válida para la ejecución de este tipo de trabajos, recorrer el talud desde la zona superior con dirección hacia la zona inferior, y realizar los diferentes armados, hace que se puede cubrir mayor área, específicamente ayuda a capturar el cuerpo del deslizamiento, actividad fundamental para lograr monitorear por completo el movimiento.

Es fundamental contar con diferentes escaneos del sitio de estudio en diferentes épocas del año, de esta manera es posible relacionar las épocas lluviosas con los desplazamientos presentes, en el actual documento, se realizó el monitoreo del sitio de estudio, desde el mes de Diciembre hasta Junio, y fue posible evidenciar el incremento en la velocidad del desplazamientos cuando las lluvias nuevamente se reactivaron (Abril).

La fabricación e implementación de señales visuales en lámina de aluminio y tubo galvanizado, fue fundamental para poder realizar el “amarre” entre los tres escaneos realizados, esto permitió contra con puntos fijos fuera de la zona en movimiento, y posteriormente compara los escaneos.

La existencia de estructuras de contención y manejo de aguas superficiales en el sitio de estudio fue ventajoso para el análisis de la problemática y la realización del monitoreo planteado, los muros de gaviones existentes en el costado norte y paralelos a la vía que comunica a Medellín con San Pedro, dan un claro indicio de la existe de problemas de inestabilidad, el monitoreo efectuado arrojó lecturas de desplazamientos de una sección del muro de gaviones, desplazamientos del orden de 40 centímetros con referencial a los puntos tomados en Enero del mismo año, de la misma manera, se detectaron desplazamientos en el dissipador (estructura de concreto) del orden de 40 centímetros, información que corrobora la existencia de un movimiento de reptación en el sitio.

Se obtienen variaciones topográficas con valores en el rango de 0.15 a 0,98 m con referencia a la superficie del relieve existente en Enero de 2016. Estas variaciones corresponden a procesos generados por la constante inestabilidad de la zona, con el fin

de establecer su velocidad se toma un valor promedio de desplazamiento de 45 cm en 6 meses.

El sitio de estudio presenta una velocidad lenta y muy lenta, del orden de 90 mm/año o 0,9 m/año, los daños son evidentes en pocos meses, las señales de desplazamiento: obras existentes, obras reparadas, información de testigos, imágenes fotografías e imágenes antiguas indican que este es de velocidad clase 3 y 2; Construcciones remediales se pueden realizar durante el movimiento. Algunas estructuras pueden mantenerse con mantenimiento frecuente, el deslizamiento se clasifica como mediano, clase de tamaño por volumen: 4, el volumen calculado del deslizamiento en promedio es de m^3 .

De acuerdo al tipo de suelo presente en la zona de estudio, se sabe que la figura del movimiento de falla presente no es circular, un movimiento rotacional, no presenta una superficie de falla circular, sino un tipo de falla planar, en relación al depósito de suelo, su magnitud y las deformaciones medidas en la parte baja del deslizamiento. El análisis de estabilidad y la modelación realizada en el software es con el fin de determinar el espesor probable desplazado y calcular un volumen de masa.

Los mayores desplazamientos medidos se concentran en la parte baja del talud (al sur), mientras que hacia la corona del talud se identificaron desplazamientos relacionados con las obras presentes, este comportamiento se considera propio de la evolución geomorfológica del relieve por el movimiento de tipo reptación, donde se está acumulando material en la pata del deslizamiento y de presentan deformación en su relieve.

La técnica de monitoreo remota con la tecnología LIDAR terrestre (TLS) demuestra ser un método preciso para detectar las características geomorfológicas del terreno, y los desplazamientos. Esta técnica permitió proporcionar información sobre la evolución temporal de la actividad del movimiento de tipo reptación área de estudio durante 6 meses, y detecta cambios diferenciales de la topografía.

El conocimiento y la aplicabilidad de las TIC en la ingeniería geotécnica, es fundamental para lograr resultados de mayor calidad y precisión, así como tener conocimientos y dar

respuesta a eventos y/o condiciones geotécnicas que puedan afectar la estabilidad de zonas o de proyectos en particular, los softwares empleados en este trabajo de grado, son de fácil manejo y entendimiento, y están diseñados para incrementar la precisión y velocidad de los trabajos en la fase de post procesamiento.

Realizar modelación del sitio empleando software geotécnico, permite realizar una primera evaluación rápida de la estabilidad del sitio, para así confirmar dichos datos en campo empleando una técnica de monitoreo, para el talud objeto del estudio en particular, ambos F.S calculados se encuentran por debajo de los valores mínimos exigidos por la norma.

Los desplazamientos diferenciales calculados para el deslizamiento muestran que estuvo activo desde el mes de Enero del 2016 hasta el 27 de Julio del 2016. El resultado de su actividad ha sido una deformación en su superficie con cambios notorios de topografía hacia la pata del deslizamiento, dando a la masa una forma flexionada.

Las deformaciones más notorias se detectaron entre los meses de abril y julio, tiempo donde que coinciden con una época fuertemente lluviosa, lo cual pone de manifiesto que el agua acumulada por la precipitación (entre 10 y 45 mm/mes) incremento la actividad y velocidad del deslizamiento

Referencias Bibliográficas

Geotecnia Vial. (s.f.). *Manual de Estabilidad de Taludes, Capítulo 1.4, Rocas del Territorio Colombiano.*

Universidad Nacional. (s.f.). *El estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, generados por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales para el municipio de Medellín y demás municipios del Valle de Aburrá.*

Alcaldía de Medellín. (s.f.). *Estudio de Instrumentación y microzonificación sísmica del área urbana de Medellín* . Medellín: SIMPAD-Universidad EAFIT-Integra-Ingeominas- Universidad Nacional.

Alonso, E., Corominas, J., & Hürlimann, M. (2011). *VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables Palma de Mallorca, Junio 2013 Monitorización de un talud en yesos mediante laser scanner terrestre (tls): el caso de la peña de Finestar Alicante.* Barcelona: CIMNE, , , .

Cifuentes Zaldúa, D. L. (2011). *Modelación de vulnerabilidad física de estructuras de uno y dos pisos, asociada a deslizamientos.*

De Topografía. (12 de noviembre de 2012). *¿Qué es el Láser escáner terrestre?* Obtenido de <http://detopografia.blogspot.com.co/2012/11/que-es-el-laser-escaner-terrestre.html>

Departamento administrativo de planeación . (s.f.). *Plan parcial de desarrollo en suelo de expansión – pajarito – documento técnico de soporte; plan parcial de desarrollo en suelo de expansión– sector de pajarito.*

Duque, G. (2003). *Manual de Geología para Ingenieros.* Manizales: Universidad Nacional de Colombia.

El Consorcio Microzonificación y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá . (2006). *Estudio de Microzonificación Sísmica Detallada de los Municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado, desarrollado entre .*

García, M. (1998). *Manual de Estabilidad de Taludes*, INVIAS.

Guthrie, R. H., & Cuervo, V. (1973). *Entendimiento de Riesgos Geológicos; Taludes, Ríos y líneas Costeras*.

Hermelin, M. (2007). *Valle de Aburra*.

Lynn M. Highland. (s.f.). *Manual de derrumbes: Una guía para entender todo sobre los derrumbes Servicio Geológico de los Estados Unidos y Peter Bobrowsky, Servicio Geológico del Canadá Circular 1325 Departamento del Interior de los EE.UU.*

Montoya Botero, E., Martínez Carvajal, H. E., & García Aristizába, E. F. (2015). *Aplicação de Métodos Probabilísticos na Previsão Espacial de Escorregamentos Deflagrados por Chuvas – Estudio de caso: Pajarito, Medellín, Colombia. 15th conferencia panamericana de mecánica de suelos e ingeniería geotécnica, Buenos Aires – Argentina en Noviembre.*

Ruiz, P., Garro, J., & Soto, G. (2014). *El Uso de Imágenes Lidar en Costa Rica: Casos de Estudio Aplicados en Geología, Ingeniería y Arqueología. Geol. Amér. Central n.51 San Pedro de Montes de Oca Jul./Dec. .*

Shuk Erdos, T. (1999). *Zonificación Geotécnica Cuantitativa por medio de la Metodología de Taludes Naturales, Sexto congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Bogotá .*

Simpad. (1999). *Instrumentación y microzonificación sísmica del área urbana de la ciudad de Medellín, Informe final (No. Contrato C112 de 1997) . Medellín: Facultad nacional de minas, Universidad EAFIT, Ingeominas, Integral.*

Slopes, Rivers & Coastlines, R.H. Guthrie, V.A. Cuervo. (s.f.). *Understanding Geohazards*.

Suarez, J. (1992). *Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales, Cimientos y Diseño de Obras en Gaviones*.

Suarez, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes den zonas Tropicales*.

Suarez, J. (s.f.). *Deslizamientos, Tomo 1, Capítulo 1, Análisis Geotécnico*.

Varnes , J. (1878). *Carta de estabilidad mundialmente empleada.*