



**Práctica de asesoría en el área de gestión del riesgo del municipio de Girón para el barrio
Mirador de San Juan**

Silvia Patricia Aragón Pontón

Julián David Rojas Delgado

Trabajo de grado en la modalidad de práctica empresarial para optar al título de
Geólogo

Director

Jaiber Leonardo Villamizar Cáceres

Geólogo

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico-Químicas
Escuela de Geología
Bucaramanga
2018**

Dedicatoria

Al Dios quien ha hecho posible la realización de tan gran proyecto,
a mi hermosa madre Diosglina Pontón quien me ha enseñado a no rendirme,
a mi padre José Aragón y mis hermanos Yuli Aragón y José M. Aragón
quienes con su querer me motivan día tras día,
a Diego quien me ha escuchado y con su cariño me anima
a Angie con quien he aprendido que la amistad te hace familia
Y a cada una de las personas con quienes pude compartir a lo largo de este camino,
profesores, compañeros, amigos y familiares.

Silvia Patricia Aragón Pontón

Dedicatoria

Al Dios, immanente en todo, artífice de todo y fuente del real Amor que impulsa todo;
causa de la realización de este trabajo. Infinitas gracias.

Al mis Madres terrenales, Graciela, Alicia, Martha y Esther,
por el amor, las enseñanzas, la paciencia y la entrega.

Al la Señora Luz, por ser un ejemplo, por su incondicionalidad y por compartir
su inmenso amor, sabiduría y fortaleza con todos desinteresadamente.

Al Andrés G, Emiliano, Tata y Martis, recuerden siempre dar lo mejor de sí
y que esto no es más que un lugar de paso para viajeros.

Al mi Papá terrenal, primos, primas, tíos, tías, hermanos,
amigos y amigas del colegio, de la universidad,
del sendero y del trabajo que me han dado
enseñanzas invaluable y gratos momentos.

Julián David Rojas Delgado

Agradecimientos

A Dios que día tras día nos muestra su gran amor, otorgándonos la posibilidad de aprender, enriquecer nuestro conocimiento y realizar este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander que nos ha permitido formarnos como profesionales.

A cada uno de los docentes que aportaron tanto conocimientos como experiencias valiosas a nuestro proceso de formación, al Profesor Jaiber Villamizar quien nos guio en el desarrollo de la presente práctica.

A la Alcaldía de Girón que ha permitido el desarrollo del presente trabajo.

Al geólogo Héctor Hernández del área de Gestión de riesgo quien nos instruyó en el desarrollo de la práctica.

A los laboratoristas del laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Industrial de Santander quienes con paciencia nos transmitieron sus conocimientos.

A los habitantes del barrio Mirador de San Juan por su amabilidad y disposición de ayuda.

Y por último a cada una de las personas que de una u otra forma han sido nuestro apoyo moral e intelectual.

Tabla de contenido

Introducción.....	23
1. Justificación	24
2. Objetivos.....	25
2.1 Objetivo general.....	25
2.2 Objetivos específicos	25
3. Generalidades del área de estudio.....	26
3.1 Localización.....	26
3.2 Climatología.....	26
3.3 Hidrografía.....	28
4. Marco teórico.....	31
4.1 Geología.....	31
4.1.2.1 Estratigrafía.....	33
4.1.2.2 Unidades geológicas superficiales (UGS).....	38
4.1.2.3 Antecedentes de zonificaciones de UGS	40
4.1.3 Geología estructural.....	41
4.1.4 Geomorfología	44
4.1.5 Morfodinámica.....	47
4.2 Usos del suelo	55

4.2.1 Antecedentes de zonificaciones de usos de suelo	57
4.3 Geotecnia	59
4.4 Zonificación de amenaza por fenómenos de remoción en masa.....	66
4.4.1 Factores detonantes de inestabilidad.....	67
4.4.1.1 Lluvia	67
4.4.1.2 Sismos	67
4.4.2 Método heurístico.....	68
4.4.3 Métodos determinísticos.....	71
5. Metodología	76
5.1 Fase I: Recopilación de información.	77
5.2 Fase II: Definición del modelo geológico – geotécnico.....	79
5.2.1 Condiciones geológicas.	79
5.2.1.1 Estratigrafía y unidades geológicas superficiales.	79
5.2.1.2 Geología estructural	80
5.2.1.3 Geomorfología	81
5.2.1.4 Usos del suelo.	83
5.3 Fase III: Identificación preliminar de la amenaza.....	84
5.3.1 Identificación preliminar de la amenaza.....	84
5.4 Fase IV: Preparación y entrega de los productos finales.	85
6. Resultados	86
6.1 Condiciones geológicas – geotécnicas.....	86

6.1.1 Condiciones geológicas.....	86
6.1.1.1 Litología y Unidades geológicas superficiales (UGS).....	86
7.1.1.1.1 Columnas estratigráficas.....	98
7.1.1.1.2 Definición de facies sedimentarias.....	99
6.1.1.5 Geomorfología y elementos geomorfológicos.....	105
6.1.1.6 Morfometría.....	123
6.1.1.6 Morfodinámica.....	124
6.1.1.8 Usos del suelo.....	129
6.1.3 Modelo geológico – geotécnico.....	135
6.2 Identificación preliminar de la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa.....	136
6.3 Identificación y evaluación preliminar de la amenaza por fenómenos de remoción en masa.....	140
6.3.1 Evaluación preliminar de amenaza por métodos determinísticos.....	148
6.3.1.1 Talud A.....	152
6.3.1.2 Talud B1.....	167
7. Conclusiones.....	171
8. Recomendaciones.....	173
Referencias bibliográficas.....	175

Lista de figuras

- Figura 1. Localización geográfica del área de estudio. Mapa de Santander modificado de la cartografía del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), mapa de Girón modificado de <http://www.geocities.ws/sanjuangiron/index-2.html> y mapa base del área de estudio tomado de la base de datos del software ArcGIS 10.3. 27
- Figura 2. Modelo estructural regional de la zona de estudio. Tomado de Vargas & Niño (1992). 41
- Figura 3. Esquema de jerarquización geomorfológica propuesto para el Servicio Geológico Colombiano. Tomado de Carvajal (2012). 44
- Figura 4. Esquema de caída de bloques. Tomado de PMA (2007). 49
- Figura 5. (a) y (b) Evolución de volcamiento de bloques. (c) Volcamiento flexural. Modificado de PMA (2007). 50
- Figura 6. Tipos de deslizamientos. (a) deslizamiento traslacional. (b) deslizamiento rotacional. Modificado de PMA (2007). 52
- Figura 7. Tipos de movimientos de propagación lateral. (a) Propagación lateral en materiales rocosos. (b) Propagación lateral en materiales licuados. Modificado de PMA (2007). 53
- Figura 8. Tipos de flujo según su geometría o grado de confinamiento. (a) flujos canalizados. (b) flujos no canalizados. Modificado de PMA (2007). 54
- Figura 9. (a) y (b) esquemas de reptación y solifluxión en una ladera respectivamente. Modificado de PMA (2007). 55
- Figura 10. Esquema de representación del modelo general de la metodología Corine Land Cover. Tomado de IDEAM (2012). 57
- Figura 11. Esquema de representación del modelo usado para la clasificación del uso del suelo. Tomado de INGEOMINAS (2007). 58
- Figura 12. Equipo tradicional para ensayos de granulometría. Tomado de <http://mecanicadelossuelos.blogspot.com.co/p/analisis-mecanico-del-suelo.html>. 62

Figura 13. Máquina o cuchara de Casagrande. Tomado de http://proetisa.com/proetisa-productos.php?ID=178 .	64
Figura 14. Esquema del ensayo de corte directo. Tomado de PUCV (1998).	65
Figura 15. Metodología general del análisis del método heurístico para zonificación de amenaza. Tomado de Suarez (2009).	71
Figura 16. Superficie de falla y dirección de la resistencia al cortante. Tomado de U.S. Corps of Engineers (2003) en Suárez (2009).	72
Figura 17. Flujo metodológico del estudio.	78
Figura 18. UGS Sco1. Se evidencia densa cobertura vegetal y depresión topográfica asociadas.	88
Figura 19. UGS Sft3 en el talud sur del barrio.	90
Figura 20. UGS Sft4. Afloramiento en la parte más alta de la zona, se evidencia suelo altamente erosionado por la exposición a los agentes denudativos.	92
Figura 21. UGS Sfl3 en afloramiento en la entrada al barrio Bellavista, adyacente al sur de la zona de estudio.	93
Figura 22. UGS Sfe1. Afloramiento de la unidad en el Talud principal en la entrada del barrio Mirador de San Juan.	94
Figura 23. UGS Sla, sobre la ladera norte del barrio.	95
Figura 24. Imágenes satelitales multitemporales mostrando la evolución del llano antrópico al interior del barrio sobre un antiguo cauce de drenaje. A (2002), B (2005), C (2009) y D (2015). Tomado y modificado de Google Earth.	96
Figura 25. Mapa de unidades geológicas superficiales	97
Figura 26. Distribución espacial UGS	97
Figura 27. Facies Gravas arenosas en la base de la columna A1 Z2-Z3.	100
Figura 28. Facies Arenas gruesas a finas en la columna A1 Z2-Z3.	100

Figura 29. Representación de las columnas estratigráficas A1Z1-A1Z2, A1Z3 y A1Z4 y la ubicación de las facies identificadas. F1: Facies gravas arenosas, F2: Facies areniscas gruesas a finas y F3: Facies Gravas arenosas lenticulares.	102
figura 30. Contacto erosivo de estructura sedimentaria lenticular en la facies F3.	102
Figura 31. Planta esquemática y sección transversal de un abanico aluvial, señalando las partes en que se divide esta geoforma. Tomado de: Sedimentología del proceso físico de la cuenca, Arche, 2010.	103
Figura 32. Corte geológico A-A' de la zona de estudio.	104
Figura 33. EG D1. Corresponde a la parte más alta de la ladera sur del barrio.	107
Figura 34. EG D7. Unidad cubierta de vegetación, localizada al sur del barrio Bellavista.	108
Figura 35. Obras en ejecución para la estabilización de la vía localizada sobre el talud del EG D7.	109
Figura 36. EG D10. Unidad ubicada en la ladera norte del barrio.	110
Figura 37. EG D11. Unidad ubicada sobre la ladera sur del barrio. Escasa intervención antrópica.	111
Figura 38. EG D13. Unidad ubicada sobre la ladera sur del barrio, se evidencia la alta cobertura vegetal y la depresión topográfica asociada.	114
Figura 39. EG D19. Unidad ubicada sobre la parte más alta de la ladera sur del barrio. Presenta un alto grado de erosión formando surcos y cárcavas, además de ausencia de cobertura vegetal.	115
Figura 40. EG A2. La mayoría del barrio se encuentra sobre esta unidad. Se evidencian los distintos niveles de terrazas acondicionados para la construcción de las viviendas.	116
Figura 41. Ubicación de los cortes topográficos sobre los rellenos antrópicos.	118
Figura 42. Cortes topográficos multitemporales sobre el relleno antrópico.	119
Figura 43. EG A9. La cancha principal del barrio corresponde a un ejemplo de esta unidad, ubicada sobre una antigua ladera al norte del barrio.	119

Figura 44. EG A10. Unidad ubicada adyacente al paso de vías y producto de la construcción de estas, como la carretera Girón – Lebrija. Nótese que no se tienen obras para estabilizar los movimientos en masa aun cuando hay casetas comerciales y tránsito de peatones adyacente al talud.	121
Figura 45. Mapa de unidades geomorfológicas.	122
Figura 46. Distribución espacial de elementos geomorfológicos.	122
Figura 47. Mapa de pendientes.	123
Figura 48. Distribución espacial de pendientes	124
Figura 49. Caída de detritos en la entrada al barrio Mirador de San Juan.	125
Figura 50. Deslizamiento traslacional en la ladera norte del barrio Mirador de San Juan.	126
Figura 51. Mapa morfodinámico de procesos de remoción en masa.	128
figura 52 Mapa de usos del suelo con metodología de Ingeominas (2007)	131
Figura 53. Distribución espacial de usos del suelo con metodología de Ingeominas (2007)-	131
Figura 54 Mapa de usos del suelo con metodología CLC	133
Figura 55 Orientación de las capas del suelo gravoso del miembro Órganos en relación con los taludes sur y norte de la zona de estudio.	135
Figura 56. Mapa de susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa.	139
Figura 57. Distribución espacial de la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa.	140
Figura 58. Mapa heurístico de amenaza por fenómenos de remoción en masa para condiciones sin sismos y sin lluvias.	142
Figura 59. Distribución espacial de amenaza por fenómenos de remoción en masa para condiciones sin sismos y sin lluvias.	143
figura 61. Mapa heurístico de amenaza por fenómenos de remoción en masa para condiciones con lluvias anormales.	145
figura 60. Distribución de amenaza por fenómenos de remoción en masa para condiciones con lluvias anormales.	145

Figura 62. Mapa heurístico de amenaza por fenómenos de remoción en masa para condiciones con sismos anormales.	146
Figura 63. Distribución espacial de amenaza por fenómenos de remoción en masa para condiciones con sismos anormales.	146
figura 64. Mapa heurístico de amenaza por fenómenos de remoción en masa para condiciones con lluvias y sismos anormales.	147
figura 65. Distribución espacial de amenaza por fenómenos de remoción en masa para condiciones con sismos y lluvias anormales.	147
Figura 66. Talud A1Z1.	153
Figura 67. Modelo de estabilidad en condiciones actuales o normales, sin sismo y sin lluvia. Talud A1, Zona 1.	153
Figura 68. Modelo de estabilidad en condición con lluvias anormales (parcialmente saturado) talud A1, Zona 1.	154
Figura 69. Modelo de estabilidad en condiciones con sismicidad talud A1, Zona 1.	155
Figura 70. Modelo de estabilidad en condiciones con lluvias anormales (parcialmente saturado) y con sismicidad talud A1, Zona 1.	155
Figura 71. Talud A1Z2.	156
Figura 72. Modelo de estabilidad en condiciones normales A1, Zona 2.	157
Figura 73. Modelo de estabilidad en condiciones con sismicidad talud A1, Zona 2.	157
Figura 74. Modelo de estabilidad en condiciones con lluvias anormales (parcialmente saturado) talud A1, Zona 2.	158
Figura 75. Modelo de estabilidad en condiciones con lluvias anormales (parcialmente saturado) y con sismo talud A1, Zona 2.	158
Figura 76. Talud A1Z3.	159
Figura 77. Modelo de estabilidad en condiciones normales talud A1, Zona 3.	160
Figura 78. Modelo de estabilidad en condiciones con sismicidad talud A1, Zona 3.	160

Figura 79. Modelo de estabilidad en condiciones con lluvias anormales (parcialmente saturado) talud A1, Zona 3.	161
figura 80. Modelo de estabilidad en condiciones con lluvias anormales (parcialmente saturado) y con sismos talud A1, Zona 3.	162
Figura 81. Talud A1Z4.	163
Figura 82. Modelo de estabilidad en condiciones normales A1, Zona 4.	164
Figura 83. Modelo de estabilidad en condiciones con sismicidad y lluvias anormales (parcialmente saturado) Talud A1, Zona 4.	164
Figura 84. Modelo de estabilidad en condiciones con lluvias anormales (parcialmente saturado) talud A1, Zona 4.	165
Figura 85. Modelo de estabilidad en condiciones con sismo y lluvias anormales (parcialmente saturado) talud A1, Zona 4.	166
Figura 86. Talud B1.	167
Figura 87. Modelo de estabilidad en condiciones normales talud B1, Zona 1	168
Figura 88. Modelo de estabilidad en condiciones con lluvia (parcialmente saturado) talud B1, Zona 1.	168
Figura 89. Modelo de estabilidad en condiciones con sismo talud B1, Zona 1.	169
Figura 90. Modelo de estabilidad en condiciones con lluvias (parcialmente saturadas) y con sismo talud B1, Zona 1.	169

Lista de tablas

Tabla 1. Cuencas, subcuencas y microcuencas del municipio de Girón. Tomado de Universidad Industrial de Santander (2000).....	29
Tabla 2 Clasificación de las UGS en base al origen. Tomado de Hermelin, 1985 y Salazar, 1995, en Ingeominas 2007).....	39
Tabla 3. UGS definidas para el área de estudio. Adaptado de Ingeominas (2007).....	40
Tabla 4. Elementos geomorfológicos identificados en el área de estudio. Adaptado de Ingeominas (2007).....	46
Tabla 5. Clasificación de movimientos en masa de Cruden y Varnes (1996).....	47
Tabla 6. Ventajas y desventajas de los principales métodos de evaluación de amenaza y las escalas idóneas de aplicación. Tomado de Alleoti, P., y Chowdhury, R (1999).....	70
Tabla 7. Diferentes metodologías usadas en el modelado de taludes. Tomado de Suarez (2009)....	74
Tabla 8.	81
Tabla 9. Jerarquización geomorfológica del barrio Mirador de San Juan.....	105
Tabla 10. Distribución espacial de elementos geomorfológicos.....	127
Tabla 11. Clasificación de unidades de uso del suelo con metodología de Ingeominas (2007).	130
Tabla 12. Clasificación de unidades de uso del suelo con metodología CLC.....	132
Tabla 13. Ecuaciones utilizadas para calcular la fricción a partir del ensayo SPT. Adaptado de Álvarez & Sandoval (2012).	134
Tabla 14. Ponderación de variables para zonificación de susceptibilidad.	136
Tabla 15. Ponderación de unidades geológicas superficiales.	137
Tabla 16. Ponderación de elementos geomorfológicos.....	137
Tabla 17. Ponderación de morfometría.	138
Tabla 18. Ponderación de usos del suelo.	138
Tabla 19. Escenarios para el análisis de estabilidad de taludes.	141
Tabla 20. Ponderaciones usadas para la zonificación de amenaza por el método heurístico.....	141

Tabla 21. Parámetros utilizados en el modelado de estabilidad del talud A1, Zona 1.....	149
Tabla 22. Parámetros utilizados en el modelado de estabilidad del talud A1, Zona 2.....	149
Tabla 23. Parámetros utilizados en el modelado de estabilidad del talud A1, Zona 3.....	149
Tabla 24. Parámetros utilizados en el modelado de estabilidad del talud A1, Zona 4.....	150
Tabla 25. Parámetros utilizados en el modelado de estabilidad del talud B1, Zona 1.	150
Tabla 26. Categorías de zonificación de amenaza para condición estática en función del factor de seguridad, tomado de CDMB (2009).....	151
Tabla 27. Categorías de zonificación de amenaza para condición pseudoestática en función del factor de seguridad, tomado de CDMB (2009).	152
Tabla 28. Cuadro resumen de los valores de factor de seguridad obtenidos para el talud A1, zona 1.	156
Tabla 29. Cuadro resumen de los valores de factor de seguridad obtenidos para el talud A1, zona 2.	159
Tabla 30. Cuadro resumen de los valores de factor de seguridad obtenidos para el talud A1, zona 3.	162
Tabla 31. Cuadro resumen de los valores de factor de seguridad obtenidos para el talud A1, zona 4.	166
Tabla 32. Resumen de los valores del factor de seguridad obtenidos para el talud B1 Zona 1.	170

LISTA DE APÉNDICES

(Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la base de Datos de la Biblioteca UIS)

Apéndice A. Mapas.

Apéndice B. Columnas estratigráficas.

Apéndice C. Estudios geotécnicos.

Apéndice D. Modelos geotécnicos.

Apéndice E. Formatos de levantamientos UGS y EG.

Apéndice F. Libreta de campo.

RESUMEN

TÍTULO: PRÁCTICA DE ASESORÍA EN L ÁREA DE GESTIÓN DEL RIESGO DEL MUNICIPIO DE GIRÓN PARA EL BARRIO MIRADOR DE SAN JUAN*.

AUTORES: SILVIA PATRICIA ARAGÓN PONTÓN, JULIÁN DAVID ROJAS DELGADO**.

PALABRAS CLAVES: GESTIÓN DE RIESGO, ZONIFICACIÓN DE AMENAZA, GIRÓN, REMOCIÓN EN MASA, ESTABILIDAD DE LADERAS.

DESCRIPCIÓN:

El presente estudio, enmarcado en las labores de gestión de riesgo geológico adelantadas por la alcaldía de Girón, aborda el análisis preliminar de amenaza por fenómenos de remoción en masa del barrio Mirador de San Juan, ubicado en el casco urbano del municipio de Girón, en un área que previamente se ha zonificado con niveles de amenaza de bajos a altos. Este barrio comenzó su fundación con anterioridad a la incorporación de los actuales protocolos de gestión del riesgo geológicos y es por esta razón que se requiere actualizar y realizar estudios de mayor detalle a escala 1:2000.

El estudio y zonificación preliminar de la amenaza se llevó a cabo en dos fases, la primera es la definición del modelo conceptual geológico-geotécnico que involucra el estudio y caracterización de los factores condicionantes del terreno como la geología, geomorfología, usos del suelo y geotecnia, y la segunda es el análisis de amenaza, donde se realizó una primera aproximación y se identificaron las zonas de mayor amenaza por el método heurístico y luego, estas zonas críticas se analizaron por métodos determinísticos; todo esto para diferentes escenarios en los cuales varían los factores detonantes, la lluvia y los sismos. Los resultados de estos análisis de amenaza son mapas cualitativos de zonificación de amenaza y clasificación de la amenaza para algunos taludes críticos en función del factor de seguridad arrojado por los métodos determinísticos, que para escenarios intermedios varía de amenaza media a alta. Por último, se plantearon recomendaciones en base a los resultados.

*Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Geología. Director: Jaiber Leonardo Villamizar Cáceres, Geólogo.

ABSTRACT

TITLE: PRACTICE OF ADVISORY IN THE AREA OF RISK MANAGEMENT OF THE MUNICIPALITY OF GIRÓN FOR THE NEIGHBORHOOD “MIRADOR DE SAN JUAN”**.

AUTHORS: SILVIA PATRICIA ARAGÓN PONTÓN, JULIÁN DAVID ROJAS DELGADO
**.

KEY WORDS: RISK MANAGEMENT, HAZARD ZONATION, GIRÓN, MASS MOVEMENT, SLOPE STABILITY.

DESCRIPTION:

This study, framed in the tasks of management of geological risk advanced by the city hall of the municipality of Girón, addresses the preliminary hazard analysis due to mass movement phenomena of the Mirador de San Juan neighborhood, located in the urban area of the municipality of Girón, in an area that has previously been zoned with low to high hazard levels. This neighborhood began its foundation prior to the incorporation of the current geological risk management protocols and it is for this reason that it is required to update and carry out more detailed studies at the 1: 2000 scale.

The study and preliminary zoning of the hazard were carried out in two phases, the first is the definition of the geological-geotechnical conceptual model that involves the study and characterization of the terrain conditioning factors such as geology, geomorphology, land use and geotechnics, and the second is the hazard analysis, where a first approximation was made and the areas of greatest hazard were identified by the heuristic method and then, these critical zones were analyzed by deterministic methods; all this for different scenarios in which detonating factors, rain and earthquakes vary. The results of these hazard analyzes are qualitative maps of hazard zoning and hazard classification for some critical slopes according to the safety factor thrown by the deterministic methods, which for intermediate scenarios varies from medium to high hazard. Finally, recommendations were made based on the results and conclusions.

*Bachelor Thesis.

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Geología. Director: Jaiber Leonardo Villamizar Cáceres, Geólogo.

Introducción

En las últimas décadas, debido al alto crecimiento de la población, se ha introducido una problemática relacionada a la expansión urbana de los centros poblados, pues en general las áreas más aptas para la urbanización ya han sido ocupadas, dejando disponibles zonas con niveles medios a altos de amenaza geológica. Es así como en la ley 1523 de 2012 (Ley 1523, 2012) y de manera más formal y sistemática en el Decreto 1807 del 19 de septiembre de 2014 (Decreto 1807, 2014) se establece que todos los municipios del territorio nacional deben realizar estudios de riesgos naturales e implementarlos a sus planes de ordenamiento territorial, con el fin de mitigar los efectos negativos de la problemática mencionada anteriormente.

Al igual que en varias localidades del país, en el municipio de Girón del departamento de Santander, se encuentran asentamientos humanos establecidos con anterioridad a la adopción de estas políticas de gestión de riesgo, como es el caso del barrio Mirador de San Juan. Tras varios años de espera, el barrio fue legalizado en el año 2014, sin embargo, a pesar de que se encuentra localizado en áreas con laderas zonificadas con niveles de amenaza muy alta, alta y media (Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras [INGEOMINAS], 2007), no cuenta con estudios suficientes ni actualizados que permitan realizar una correcta gestión del riesgo por amenaza geológica como se contempla en el Decreto 1807 del 19 de septiembre del 2014 (Decreto 1807, 2014), el cual establece que para áreas donde previamente se han identificado zonas con altos niveles de amenaza, es imprescindible realizar estudios periódicos y detallados a escala mínima de 1:2000.

Por tanto, la administración municipal de Girón formuló un proyecto para implementar estos estudios detallados para la gestión de riesgo a escala 1:2000, en el barrio Mirador de San Juan,

donde el presente trabajo abordará la fase de los estudios geológicos, teniendo su mayor contribución en la definición del modelo geológico-geotécnico de la zona de estudio, el cual es un insumo clave para consolidar el análisis de amenaza y posteriormente el análisis de riesgo.

Justificación

Dentro de las funciones básicas de las entidades públicas se encuentra velar por el bienestar de la sociedad en general, lo cual incluye para el caso de la alcaldía del municipio de Girón realizar acciones encaminadas a mitigar el riesgo geológico al que están sujetos sus habitantes. De acuerdo con la zonificación de amenaza por movimientos de remoción en masa realizada en el área metropolitana de Bucaramanga (INGEOMINAS, 2007) el barrio Mirador de San Juan presenta laderas zonificadas con índices de amenaza muy alta, alta y media, comprometiendo la integridad de los habitantes y edificaciones del barrio. Por tal motivo, en el marco de lo establecido en la ley 1523 de 2012 (Ley 1523, 2012) y en el decreto 1807 del 19 de septiembre de 2014 (Decreto 1807, 2014) con respecto a la gestión de riesgos, la secretaría de planeación del municipio formuló un proyecto para realizar estudios detallados a escala 1:2000 que permitan actualizar el conocimiento técnico del terreno y tomar medidas para reducir el riesgo al que está sometida la comunidad, donde la primera fase, objetivo del presente estudio, corresponde a la identificación de la amenaza, especialmente lo relacionado a la definición del modelo geológico-geotécnico.

Objetivos

2.1 Objetivo general

Elaborar estudios geológicos, geomorfológicos y geotécnicos en el marco de la zonificación de amenaza asociada a fenómenos de remoción en masa, en el barrio Mirador De San Juan municipio de Girón departamento de Santander.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar, describir y cartografiar las unidades litológicas superficiales y las subunidades geomorfológicas que se presentan en la zona a escala 1:2000.
- Relacionar la estratigrafía y geología estructural de la zona de trabajo para entender los diferentes procesos que han generado el material presente y su respectiva inestabilidad.
- Zonificar los diferentes materiales hallados en la zona clasificándolos según sus propiedades geomecánicas.
- Plantear un modelo geológico-geotécnico en donde se evidencie la relación directa de los rasgos geológicos y los procesos de inestabilidad presentes.
- Realizar un análisis preliminar de la amenaza por fenómenos de remoción en masa basado en los factores condicionantes de inestabilidad prevalentes en el área de estudio.

Generalidades del área de estudio

3.1 Localización

El área de estudio corresponde al barrio Mirador de San Juan, el cual se encuentra localizado en la parte norte del perímetro urbano del municipio de Girón, en el nororiente del departamento de Santander a 9 kilómetros de Bucaramanga, la capital del departamento. La zona de estudio se encuentra delimitada por las coordenadas X1: 1'099.400, X2: 1'100.110, Y1: 1'274.500 y Y2: 1'274.900, tomadas en el sistema de proyección cartesiana Magna Bucaramanga Santander 2008, cubriendo un área de 134,328 m² (Figura 1).

Fisiográficamente el municipio de Girón posee valles intermontano dada su ubicación entre el piedemonte cordillerano y el valle de la Magdalena Medio santandereano; también en esta zona se ubican las zonas de mesas (Lebrija y Ruitoque) y el valle del Magdalena Medio. La zona de mayor pendiente se establece en el escarpe de la mesa de Lebrija, la zona más plana sobre el valle del río de Oro y las zonas más onduladas predominan en la mesa de Lebrija (Universidad Industrial de Santander, 2000).

3.2 Climatología

Las características climáticas del municipio de Girón están determinadas por la topografía quebrada que da la posición fisiográfica que se encuentra establecida entre el valle del Magdalena Medio santandereano y el macizo de Santander, y también debido a la altitud (Universidad Industrial de Santander, 2000). La altitud es en promedio de 777 msnm y el municipio cuenta con una temperatura promedio de 28°C, estas características permiten que el municipio cuente con distintos microclimas (Plan de Desarrollo [PDD],2016):

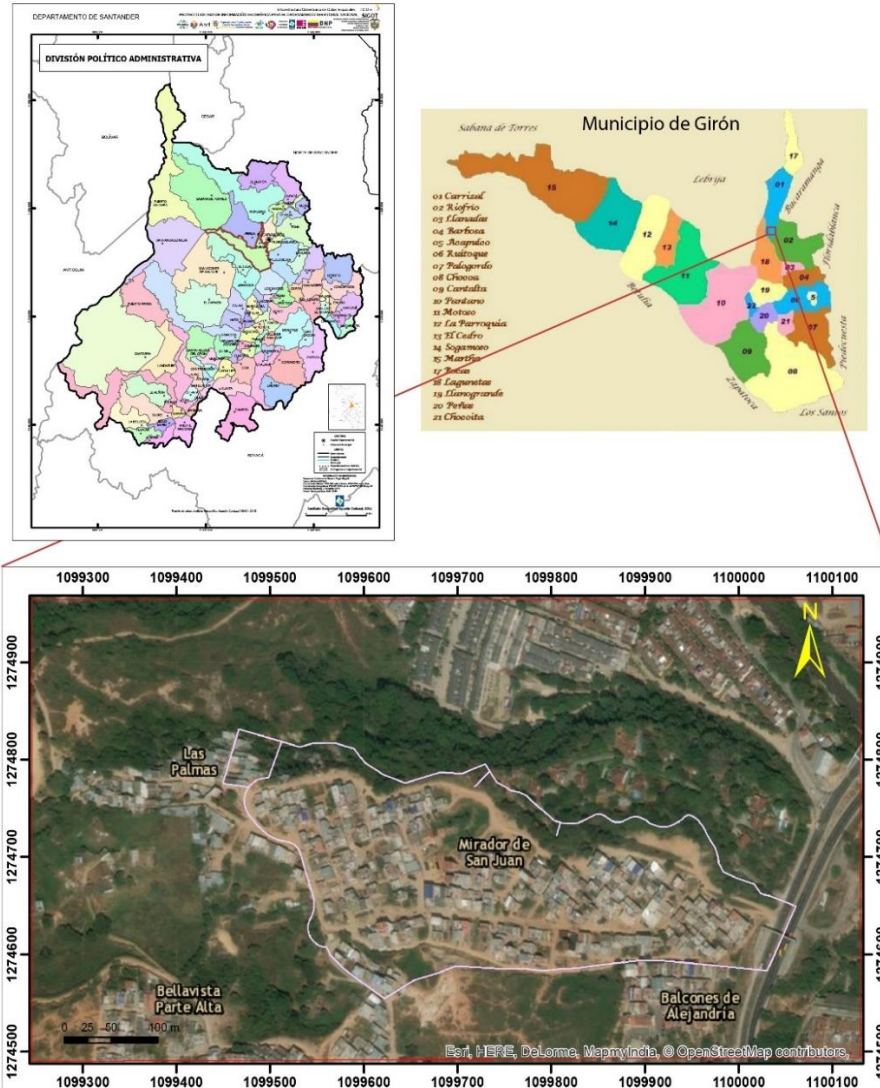


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio. Mapa de Santander modificado de la cartografía del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), mapa de Girón modificado de <http://www.geocities.ws/sanjuangiron/index-2.html> y mapa base del área de estudio tomado de la base de datos del software ArcGIS 10.3.

- Tropical cálido seco en el Valle del Rio de Oro
- Tropical húmedo en el valle del Rio Sogamoso.
- Premontano templado en la zona hacia Lebrija.

La zona de estudio, al ubicarse en el Valle del Río de Oro presenta un clima tropical cálido seco. Las altas temperaturas predominantes en el municipio se presentan como producto de la latitud y la altitud bajas; la latitud correspondiente lo ubica en la zona ecuatorial, zona en donde la temperatura varía en poca proporción durante el año (Universidad Industrial de Santander, 2000). Las precipitaciones se presentan en baja proporción y se distribuyen de forma desigual debido a las barreras naturales y a los vientos cálidos provenientes de los ríos Chicamocha y Suarez (PDD,2002); las precipitaciones que se presentan se deben a los vientos Alisios que afectan a todo el territorio nacional, provenientes de los océanos Atlántico y Pacífico; el paso de estos por la serranía de la Paz determina lo que sería la primera temporada de lluvias del año de abril a mayo y su posterior regreso al sur marca lo que corresponde a la segunda temporada que correspondería a los meses de septiembre a noviembre(PDD,2016).

3.3 Hidrografía

La cuenca superior del Río Lebrija y la cuenca media del Río Sogamoso se encuentran limitando el municipio de Girón (Universidad Industrial de Santander, 2000). Estas cuencas compuestas por lo que se consideran microcuencas, las cuales son de gran importancia porque son en estas en donde se ha asentado la mayor parte de la población del municipio (PDD, 2002).

El afluente principal del municipio de Girón es el considerado Río de Oro, el cual abastece a los municipios vecinos de Piedecuesta y Lebrija, quienes se abastecen de este al pertenecer a la microcuenca la Angula, división de la subcuenca Lebrija Alto que a su vez hace parte de la cuenca superior del Río Lebrija (PDD, 2016). A continuación, se presenta una tabla con los afluentes representativos del municipio con su participación en el territorio y características propias de cada uno (Tabla 1).

Tabla 1.

Cuencas, subcuencas y microcuencas del municipio de Girón. Tomado de Universidad Industrial de Santander (2000).

CUENCA	SUB CUENCA	MICRO CUENCA	SUBMICRO CUENCAS	CAUDAL (L/Sg)	ÁREA INFLUEN. (Ha)	AFLUENTES	USO						
							ACUE		AGROP		D-RIEG		
							S	N	S	N	S	N	
RÍO LEBRIJA	Lebrija Alto	*	Angula Alta	0.11 MB	7080	La Angula La Colorada		*	*			*	
		La Angula	Puente Nave	0.11 MB	742	La Angula Puente Ana			*	*			*
			Oro bajo bajo	0.13 B	2838	Río Frío Río de Oro	*		*				*
	Río de Oro	Oro bajo	Oro bajo medio	0.08 B	6925	Río de Oro Q. Llano Grande			*	*		*	
			Oro bajo Alto	0.07 B	5142	Río de Oro Q. Montes			*	*			*
		Río Frío	Ruitoque	0.11 B	1354	Q. Ruitoque Q. Aranzoque	*		*				*
			El Palmar	0.09 B	1610	Q. Palo Q. Palo Gordo			*	*			*
	Río SOGAMO	Sogamoso Medio	Sogamoso medio	Grande	0.09 B	2389	Loro Q. San Pedro			*	*		*
				Frío bajo	0.14 B	1162	Río Frío	*					
			Río Frío	Aranzoque	0.19 B	20	Q. Los Fríos Q. Del Monte						
		Sogamoso Alto	Sogamoso medio Alto			Z. del Carbón Q. El Potrero Q. La Hondurera							

Sogamoso medio medio	Agua Blanca	0.39 A	2892	Q. Paramera				
				Q. Guapuchero				
		0.38 A	3561	Q. Volcán	*	*		*
				Agua Blanca				
Sogamoso medio bajo (La Colonia)		0.43 A	3155	Pujamana	*	*		*
				Mata de Cacao				
	La Seca			Q. Seca	*	*		*
				C. Capitancitos				
Sogamoso bajo				Q. La Baleonera				
	Sogamoso medio bajo (La Colonia)			Q. Santa María				
				Q. La Colonia				
	Río Sucio	0.42 A	5233	C. Colorado				
				Río Sucio				
				R. Sogamoso	*	*		*

Marco teórico

En el ámbito de la amenaza por fenómenos de remoción en masa se tienen diversas guías metodológicas como la guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo publicada por el Servicio Geológico Colombiano del 2015 (SGC, 2015), la cual propone que la primera etapa del estudio debe ser la definición de un modelo geológico-geotécnico, el cual considera tanto los factores condicionantes de inestabilidad prevalentes en el área de estudio, inherentes a esta y relativamente constantes espaciotemporalmente como los factores detonantes que pueden modificar la estabilidad de una ladera. Dentro de los factores condicionantes se encuentran las características geológicas (estratigrafía, geología estructural y geomorfología), geotécnicas y los usos del suelo principalmente, mientras que los principales factores detonantes son la lluvia y los sismos, para los cuales se sugiere una evaluación en términos probabilísticos.

Una vez definido el modelo geológico – geotécnico, se procede con el planteamiento de escenarios de amenaza y por último se zonifica la amenaza, resultando en mapas de zonificación. Este procedimiento general presenta la misma secuencia metodológica establecida en los lineamientos del municipio de Girón para la elaboración de estudios de amenaza por remoción en masa (Municipio de Girón, 2011).

En este apartado, se definen los conceptos de cada fase del estudio de amenaza por remoción en masa y se exponen estudios previos realizados que incluyen el área de estudio.

4.1 Geología

La aplicación de cada una de las ramas de las ciencias geológicas para la solución práctica de problemas de ingeniería han hecho que la geología tome un papel importante en la ingeniería para

el estudio de los materiales naturales (Burwuell, E.B. & Roberts, G.D., 1950), con el fin de garantizar que los factores geológicos que puedan afectar diseños, operaciones o construcciones puedan ser identificados y tomados en cuenta para la posterior realización de cada uno de estos proyectos y el eventual uso de estos en la práctica de la ingeniería.

Entre los factores geológicos se consideran tanto los materiales como los procesos que pudiesen afectar de alguna manera los proyectos de ingeniería, por lo tanto el reconocimiento y análisis geológico de la zona que se requiere evaluar o intervenir es de suma importancia y es por ello que la cartografía geológica se presenta como la herramienta más adecuada para recoger la información del terreno (propiedades físicas y mecánicas de la rocas y suelos, agua subterránea, características del relieve y procesos geodinámicos actuales) y representarla de una manera ordenada.

4.1.1 Marco geológico regional. En el municipio de Girón afloran rocas sedimentarias jurásicas, cretáceas, terciarias y depósitos cuaternarios, los cuales son representados cartográficamente como unidades cronoestratigráficas (unidades de tiempo): mesozoicas y cenozoicas, que a su vez incluyen unidades litoestratigráficas (unidades de roca). Dichas unidades se enmarcan estructuralmente dentro de los sistemas de fallas Suarez-Rio de Oro, la falla Bucaramanga- San Vicente, anticlinal de Rio Sucio y el sinclinal de Nuevo Mundo.

4.1.2 Estratigrafía y unidades geológicas superficiales (UGS). El conocimiento estratigráfico de la zona de estudio se precisa para el entendimiento de la evolución geológica de la zona, además de ser la base para el entendimiento de la deformación estructural y las afectaciones que influyen en las unidades geológicas superficiales. La información expuesta a continuación sobre el marco estratigráfico y la zonificación de unidades geológicas superficiales se encuentra consignada en INGEOMINAS (2007).

4.1.2.1 Estratigrafía. Como se mencionaba previamente en el municipio de Girón se presentan rocas sedimentarias representadas por unidades cronoestratigráficas así:

- **Unidades mesozoicas.** Representadas por unidades litológicas sedimentarias agrupadas en unidades triásicas, jurásicas, y cretáceas.

- **Unidades triásicas:** en el municipio se encuentran representadas por la formación Bocas (TRb).

La Formación Bocas está constituida por una alternancia de limolitas, areniscas y arcillolitas calcáreas verdes y gris oscuras y capas de roca volcánica hacia la parte superior. Depositada en un ambiente tipo continental.

- **Unidades jurásicas:** representadas en el municipio por la formación Jordán (Jj) y por la formación Girón (Jg).

La formación Jordán constituida por areniscas grises verdosas de grano grueso a ligeramente conglomeráticas con estratificación cruzada, intercalada con niveles arcillosos. En la parte superior se encuentran intercalaciones de limolitas marrón rojizas con areniscas de grano fino.

La formación Girón constituida por areniscas de grano medio, grueso a ligeramente conglomeráticas, de color rojo violáceo y gris verdoso, de estratificación cruzada y capas gruesas, con interestratificación de limolitas y lodolitas de color rojo violetas

- **Unidades cretáceas:** se hallan en el municipio de Girón representadas por las formaciones Los Santos, Rosa Blanca, Paja, Simiti, La Luna y Umir.

La Formación Los Santos (Tambor Kita) está constituida por areniscas conglomeráticas, lodolitas rojo-grisáceas y cuarzo areniscas gris amarillentas, en capas

tabulares de espesor variable. La formación Los Santos fue definida inicialmente por Cediel (1968) y redefinida por Laverde (1985).

La Formación Rosa Blanca (Kir) está compuesta en su parte inferior por capas de caliza y yeso, y hacia la parte superior por areniscas y lodolitas calcáreas; su origen de depositación es considerado marino somero. Originalmente fue descrita por Wheeler (1929).

La Formación Paja (Kip) está constituida por lutitas y shales gris oscuro con intercalación de areniscas gris amarillentas, de grano fino, y calizas grises arenosas y fosilíferas. Inicialmente fue descrita por O.C. Wheeler (1958).

La Formación Tablazo (Kit) está compuesta por calizas grises a negras, fosilíferas, arcillolitas negras y grises y areniscas grises de grano fino. El ambiente de depositación corresponde a marino somero. Inicialmente la formación fue descrita por O.C. Wheeler (1958).

La Formación Simití (Kis) consta de shales grises a negros, carbonosos, con intercalaciones de areniscas y calizas grises, en capas delgadas. Las condiciones de depositación se consideran marinas de aguas medias a profundas. Descrita por geólogos de Intercol (1958).

La Formación La Luna (Ksl) está constituida por calizas gris oscuras, arcillolitas y lutitas grises con intercalaciones de calizas arcillosas. En el valle del Magdalena Medio se divide en tres miembros: Inferior Salada, Intermedio Pujamana y Superior Galembo. El ambiente es marino de aguas someras. descrita por A. Garner (1968).

La Formación Umir (Ksu) está conformada por shales negros carbonosos, lutitas grises con nódulos ferruginosos intercalados con areniscas y limolitas grises y capas de carbón. Su ambiente de depositación es nerítico.

- **Unidades Cenozoicas:** son representadas por rocas sedimentarias y se encuentran dentro de las unidades terciarias y cuaternarias.
 - **Unidades terciarias:** afloran en la región oriental y occidental del departamento de Santander y ocupan grandes extensiones. En el municipio de Girón se encuentran las unidades terciarias Lisama, La Paz, Esmeralda, Mugrosa y Colorado.

La Formación Lisama (Tpl) está constituida por una secuencia de lutitas abigarradas, alternadas con areniscas grises y capas delgadas de carbón. La depositación de estos sedimentos ocurrió en un ambiente continental bajo condiciones lagunares deltaicas. Fue descrita originalmente por Th. Link (1958) y publicada por Wheeler (1974)

La Formación La Paz (Tel) está compuesta por areniscas grises conglomeráticas, conglomerados, limolitas y paquetes de lutitas grises. Estos sedimentos fueron depositados en ambiente continental de corrientes trenzadas. La formación fue definida por primera vez por los geólogos de la Gulf Oil Company (1958).

La Formación Mugrosa (Tomi, Toms) está compuesta por areniscas gris verdosas, lodolitas grises y capas de areniscas conglomeráticas, intercaladas con shales y lodolitas. El nombre de la formación fue dado por A. K. Gill (1958).

La Formación Colorado (Toc) está constituida por arcillolitas pardo rojizas, con intercalación de areniscas conglomeráticas, arcillolitas negras carboníferas, y areniscas de grano medio en delgadas capas. Definida por A. K. Gill (1958).

- **Depósitos cuaternarios:** en el municipio son muy variados en su origen y composición, se encuentran ampliamente distribuidos a lo largo del piedemonte de la mesa de Lebrija y en los valles de los ríos y quebradas principales. En Girón se pueden clasificar en dos tipos: la formación meseta de Bucaramanga, y los depósitos aluviales recientes de aluviones, coluviones y derrubios.

La Formación Bucaramanga compuesta por Cinco segmentos denominados de más antiguo a más nuevo estratigráficamente: calcáreos, órganos, finos, gravoso y limos rojos. Su ambiente de depositación ha sido interpretado como un abanico húmedo, formado por el paleocauce del río Suratá, cuyo ápice está desfasado aproximadamente 2,5 Km con respecto al río. El desfase del ápice ha sido atribuido a la actividad neotectónica de la falla Bucaramanga-Santa Marta (Jiménez, Speranza, Faccena, Bayona, & Mora, 2015). En el municipio de Girón afloran los cuatro niveles superiores de la formación Bucaramanga correspondientes a los segmentos órganos, finos, gravoso y de limos rojos.

El segmento Órganos corresponde al nivel 2 de la formación Bucaramanga, está constituido por capas gruesas a muy gruesas de variable espesor, texturalmente se trata de una grava de matriz granosoportada a lodosoportada, subredondeada a redondeada, con esfericidad baja a media y mal calibrada.

El segmento Finos (Qbf) corresponde al nivel 3 de la formación Bucaramanga, su espesor aproximado es de 20 m, presenta capas finas de geometría tabular y lenticular,

con laminación plano paralela, cruzada y ondulada. Texturalmente consta de arenas arcillosas, arcillas arenosas ligeramente micáceas y gravas, se encuentran costras de óxidos y trazas de materia orgánica.

El segmento Gravoso (Qbg) corresponde al nivel 4 de la formación Bucaramanga, posee un espesor aproximado de 8 m y está compuesto por un depósito de gravas con matriz areno - lodosa de color rojizo a anaranjado.

La Formación Bucaramanga fue estudiada inicialmente por Julivert (1961) quien describió el nivel de Limos Rojos, posteriormente es descrita como formación Bucaramanga por Niño y Vargas (1992), quienes describen sus cinco niveles y proponen el modelo de depositación de abanico para estos sedimentos. Se les ha asignado una edad Pleistoceno - Holoceno (2 - 0.01 m.a.).

Los depósitos aluviales también se clasifican dentro de las unidades cuaternarias, corresponden a sedimentos no consolidados de aluviones, coluviones y derrubios y se encuentran principalmente en las márgenes de los ríos y quebradas del área. Entre éstos se encuentra la Terraza Baja (Qt 1), la cual corresponde a las antiguas llanuras de inundación de las corrientes existentes, alcanzan espesores hasta de 8 m, y están formados por lentes de arena, arcilla y gravas de colores amarillentos a blancos.

La Terraza Media (Qt 2) corresponde a antiguas llanuras de inundación dejadas por el río de Oro y que han quedado levantadas del nivel actual del río por la actividad tectónica del área.

Los depósitos coluviales (Qc) están formados por antiguos movimientos de remoción en masa (deslizamientos, desprendimientos, etc.) que generalmente se

localizan en la parte baja de escarpes montañosos como producto de meteorización y fracturamiento, su granulometría es irregular y se caracterizan por presentar cantos angulares.

Los depósitos aluviales recientes corresponden a sedimentos de matriz arcilloarenosa, de coloración oscura, por el contenido de materia orgánica, con presencia de cantos redondeados de variada composición.

Estratigráficamente en la zona de estudio únicamente afloran depósitos cuaternarios principalmente correspondientes al segmento órganos de la Formación Bucaramanga, depósitos coluviales y unidades de origen antrópico. No obstante, es importante tener presente la secuencia estratigráfica pues el área ha sido fuertemente deformada estructuralmente, por lo que se podrían encontrar unidades más antiguas a las cuaternarias a profundidades diferentes a las esperadas, con comportamientos geotécnicos totalmente distintos a las unidades que afloran.

4.1.2.2 Unidades geológicas superficiales (UGS). UGS es un término usado para denominar los materiales que conforman la superficie que se encuentra a una profundidad del orden de decenas de metros, (Hermelin, 1987). Estas UGS incluyen tanto suelos como rocas desde el punto de vista de la ingeniería, entre las cuales se pueden destacar: rocas y sus estructuras, suelos residuales y saprolitos, depósitos transportados desde cualquier ambiente y depósitos antropogénicos. La clasificación más general de los materiales geológicos en geología para ingeniería consiste en categorizar los materiales dentro de cuatro grandes grupos (SGC, 2015):

- Suelos residuales y saprolitos
- Suelos transportados en cualquier ambiente
- Suelos antrópicos

No obstante, considerando los agentes que dan origen a distintas unidades se recomienda clasificarlas de acuerdo a su origen (SGC, 2015) en base a categorías presentadas en la tabla 2.

Tabla 2

Clasificación de las UGS en base al origen. Tomado de Hermelin, 1985 y Salazar, 1995, en Ingeominas 2007).

CLASIFICACIÓN DE UGS SEGÚN SU ORIGEN

Origen de la UGS	Tipo de UGS
Derivadas de roca In situ	<ul style="list-style-type: none"> - Roca inalterada - Saprolito - Suelos Residual
Depósitos aluviales	<ul style="list-style-type: none"> - Aluviones recientes o de lecho de río - Llanuras aluviales - Abanicos o conos aluviales - Terrazas aluviales - Depósitos torrenciales - Depósitos fluviotorrenciales.
Depósitos lacustres y paludales	<ul style="list-style-type: none"> - Depósitos lacustres
Depósitos de ladera, de vertiente o coluviales	<ul style="list-style-type: none"> - Coluviones - Talus - Flujos (de lodo, tierra y de escombros) - Derrubios de pendiente
Depósitos costeros	<ul style="list-style-type: none"> - Deltas, Barras, Playas, etc.
Depósitos volcánicos	<ul style="list-style-type: none"> - Tefras - Surges - Flujos Piroclásticos - Ignimbritas - Flujos de lodos Volcánicos - Lahares - Cenizas - Coladas de Lava.
Depósitos eólicos	<ul style="list-style-type: none"> - Dunas - Loess - Cenizas volcánicas
Depósitos glaciares	<ul style="list-style-type: none"> - Morrenas y Tillitas - Fluvioglaciares

Depósitos antrópicos

- Rellenos sanitarios o de basuras
- Rellenos de excavaciones
- Escombreras o botaderos

4.1.2.3 Antecedentes de zonificaciones de UGS. En base a la litología predominante en la zona de estudio cabe resaltar que en el marco de la ingeniería se considera como suelos a los materiales granulares cementados o no cementados (arena, limo, grava y bloques) y arcillas plásticas cohesivas, así como también la combinación de los anteriores tipos. (INGEOMINAS, 2007).

En INGEOMINAS (2007, 2009) se realizó una zonificación de UGS para el área metropolitana de Bucaramanga, donde se tienen un primer nivel de categorización relacionado al tipo de material discriminando entre rocas (R) y suelos (S), donde en la zona de estudio únicamente afloran unidades de suelo. Posteriormente el segundo nivel corresponde al factor o agente dominante en el origen de la unidad, determinando para el área de estudio dos categorías: unidades de suelo transportado y unidades de suelo de origen antrópico. Luego de esto, teniendo en cuenta el agente específico generador de la unidad y la litología de estas, se definieron los suelos coluviales (co), suelos fluviotorrenciales (ft), suelos fluviolacustres (fl), suelos de flujo de escombros (fe) y para el agente antrópico se definieron los suelos de llenos antrópicos (la) (tabla 3).

Tabla 3.

UGS definidas para el área de estudio. Adaptado de Ingeominas (2007).

		Unidades geológicas superficiales (UGS)		
		Origen	Nomenclatura	Unidad
Suelos transportado	Coluvial		Sco1	Suelos Coluviales Recientes
			Sco2	Suelos Coluviales Antiguos
	Fluviotorrencial		Sft3	Suelo Gravoso del Miembro Órganos
			Sft4	Suelo Arenoso del Miembro Órganos

Fluviolacustre	Sfl3	Suelo Arcilloso del Miembro Órganos
Flujo de escombros	Sfe1	Suelos de Flujos de Escombros Antiguos
Suelos antrópicos	Sla	Suelos de Llenos antrópicos

4.1.3 Geología estructural. El municipio de Girón se encuentra entre el Macizo de Santander y el Valle del Magdalena medio, su casco urbano ubicado en la meseta de Bucaramanga, la cual se presenta como una depresión tectónica delimitada por un sistema de fallas longitudinales y transversales. Estructuralmente se considera como un bloque hundido limitado por el sistema de fallas de Bucaramanga-Santa Marta, que lo separa del macizo de Santander y la falla Suarez -Rio de Oro que lo separa de la mesa de Lebrija (figura 2).

Los sistemas de fallas con influencia en el municipio se pueden detectar con mayor facilidad en los mapas ya generados de la zona y mediante la ayuda de imágenes satelitales por los cuales se pueden observar los lineamientos mayores.

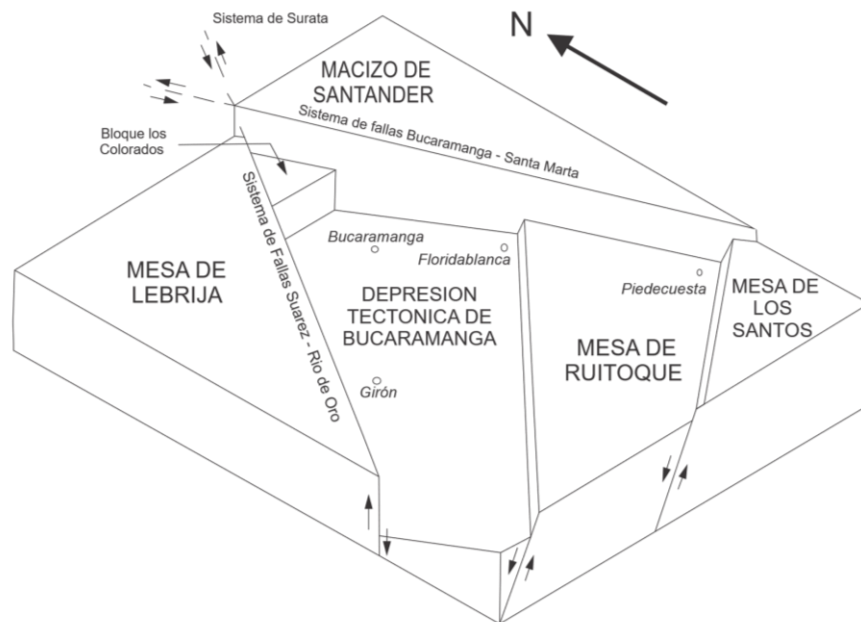


Figura 2. Modelo estructural regional de la zona de estudio. Tomado de Vargas & Niño (1992).

- Sistema de fallas Bucaramanga - Santa Marta.** Este sistema, aunque no está situado precisamente en el Municipio es tenido en cuenta por la influencia que ejerce sobre toda el área como estructura regional; se localiza al oriente de la zona de estudio y es uno de los rasgos más evidentes y de mayor extensión que cruza el área.

Este sistema de fallas tiene una longitud aproximada de 550 km desde la costa caribe hasta la cordillera oriental. De acuerdo con el rumbo y estilos estructurales puede subdividirse en tres zonas mayores (norte, central y sur), donde la zona de estudio se ubica en la zona sur la cual consta de una longitud de 310 Km con una marcada expresión topográfica, pues marca el límite entre el macizo de Santander y la cuenca del Valle Medio del Magdalena. (Jiménez, Speranza, Faccena, Bayona, & Mora, 2015).

De acuerdo con la actividad de la falla se puede establecer que su formación es posterior a la del Neiss de Bucaramanga (Daconte y Salinas, 1980). Su mayor actividad fue el desplazamiento sinistral ocurrido en el Mioceno Superior, simultáneo con la orogenia andina, además existen evidencias de la actividad neotectónica de esta falla especialmente en la zona de la meseta de Bucaramanga (Julivert, 1963; Sarria, 1988; León, 1991, et al.). En base a la hipótesis de que el río Suratá es la fuente de sedimento del abanico de Bucaramanga, su desfase de 2.5 Km con respecto al ápice del abanico ha sido atribuido a actividad sinistral de la falla de Bucaramanga al igual que el fallamiento diferencial entre la parte sur y norte del abanico, donde la parte sur presenta mayor fallamiento aparentando ser diacrónica. (Jiménez, Speranza, Faccena, Bayona, & Mora, 2015). En base a análisis de magnetoestratigrafía en las unidades del abanico, Jiménez, Speranza, Faccena, Bayona, & Mora (2015), determinan una tasa de desplazamiento de 3 mm/año para esta zona del sistema de fallas, además también muestran que considerando un intervalo de retorno de

en promedio 1000 años para los principales terremotos registrados por paleosismología (Diederix et al., (2009) en, Jiménez, Speranza, Faccena, Bayona, & Mora (2015)) dicha tasa de movimiento, la cual constituye el escenario de mayor movimiento, correspondería a terremotos de magnitudes de entre 7 y 7.5.

Por otro lado, cabe resaltar que la discusión sobre si la actividad del sistema de fallas de Bucaramanga – Santa Marta, se relaciona a la actividad del nido sísmico de Bucaramanga aún se encuentra abierta.

- **Falla del Suárez - río de Oro.** Se extiende por una longitud de 120 km desde Barbosa hasta su intersección con la falla de Bucaramanga - Santa Marta, su trazo tiene una dirección general N 20° E y N 25° E con inclinación al occidente y sigue el curso del río del mismo nombre. Es una falla inversa de ángulo alto, con un componente vertical importante y plano de falla probablemente subvertical. Anualmente se le calcula un desplazamiento vertical de 0.1 mm/año (París y Sarria, 1988) para un desplazamiento total aproximado entre 400 y 2.300 m (Ward, D. et al. 1973); además posee un desplazamiento de rumbo sinistral y existen evidencias de campo de actividad neotectónica (Julivert, 1963; Ward, 1973, et al.).
- **Falla de Ruitoque.** Esta falla es ortogonal al sistema de la falla de Bucaramanga, es de tipo normal y es la responsable del levantamiento de la mesa de Ruitoque, afecta la formación Los Santos y la pone en contacto fallado con la formación Girón, no se han reportado comportamientos de neotectónica en esta falla (Universidad Industrial de Santander, 2000).
- **Sistemas de fallas menores.** Dentro del bloque delimitado por las fallas anteriores se encuentran otros sistemas de fallas consideradas menores, entre las cuales las más

importantes son las fallas de Chocó, Llano Grande, quebrada de Los Montes y la de Palogordo entre otras (Universidad Industrial de Santander, 2000).

4.1.4 Geomorfología: Los mapas geomorfológicos constituyen uno de los insumos más importantes para el estudio y la cartografía de amenaza por fenómenos de movimientos en masa. El Servicio Geológico Colombiano o antiguo INGEOMINAS ha publicado varios documentos tratando de estandarizar la metodología aplicada para estos estudios donde se establece que para escalas 1:10000 o mayores se debe trabajar a nivel de estudio de los componentes o elementos geomorfológicos (Figura 3), como se propone en la jerarquización realizada en Carvajal (Carvajal 2004; Carvajal 2012). Dichos elementos se definen en función de los rasgos del relieve como la morfometría del terreno o perfiles de suelo.

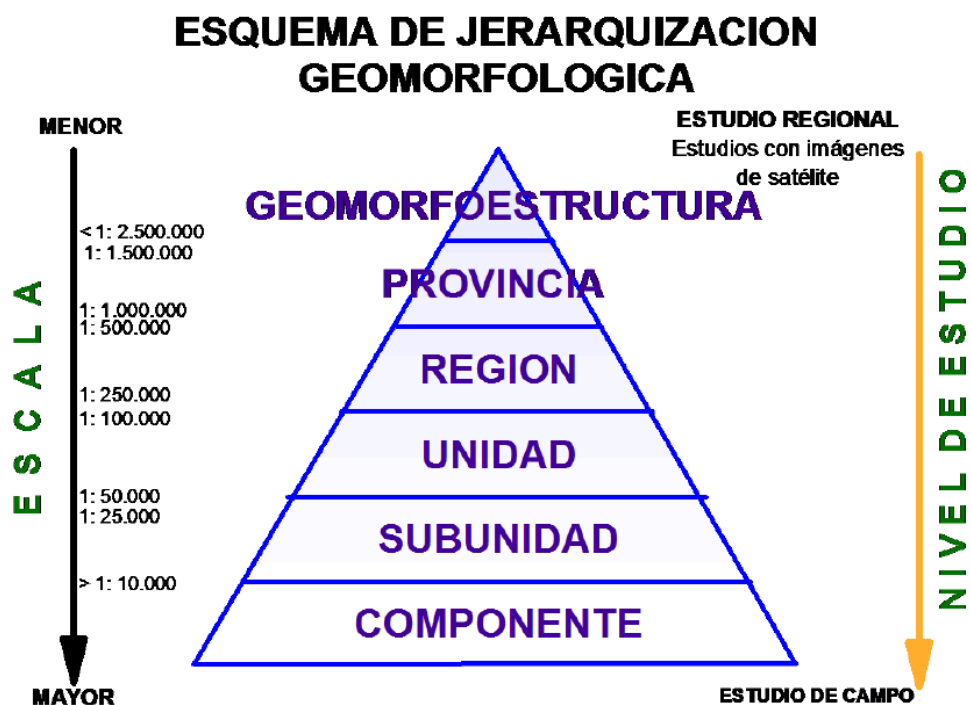


Figura 3. Esquema de jerarquización geomorfológica propuesto para el Servicio Geológico Colombiano. Tomado de Carvajal (2012).

Por otro lado, también se cuenta con guías metodológicas específicas para zonificaciones geomecánicas, de gran utilidad para aplicaciones de ingeniería (Carvajal et al., 2004), cuyo principal propósito es aprovechar la geomorfología para realizar zonificaciones de unidades con características geomecánicas similares. Para la descripción de dichas unidades se tienen en cuenta principalmente tres parámetros:

- **Morfometría:** considerando el contraste de relieve o relieve relativo, la distribución de las pendientes, la longitud de la ladera, la forma de la ladera, la densidad, frecuencia y textura de drenajes y el patrón de estos.
- **Composición litológica:** se considera en términos de las unidades geológicas para ingeniería, en términos de rocas duras, intermedias y blandas, provenientes de rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias para el caso de las rocas y para el caso de los suelos categorizándolos como transportados, transpuestos o residuales, con sus correspondientes subdivisiones.
- **Morfodinámica:** en este parámetro se identifican y describen los sitios que presenten procesos denudativos como erosión y remoción en masa, así como el tipo de material, proceso predominante y rata de movimiento de este en lo posible.

No obstante, en la SGC (2015), se incluye la cobertura de suelo como una de las variables a caracterizar para cada geoforma.

4.1.4.1 Antecedentes de zonificaciones geomorfológicas. El POT (Universidad Industrial de Santander, 2000) divide el municipio en tres zonas geomorfológicas: valle intermontano aluvio – diluvial, zona de mesas (Ruitoque, Navarra y Lebrija) y piedemonte cordillera Oriental, donde el área de estudio se enmarca en la zona del valle intermontano aluvio – diluvial colindando con la ladera oriental de la mesa de Lebrija. Esta zona en su mayoría está constituida por los depósitos

cuaternarios de la Formación Bucaramanga, lo cual hace al área susceptible a la erosión generando cárcavamientos profundos y zonas de tierras malas en algunas áreas. Dentro de la zona geomorfológica mencionada, se hacen dos subdivisiones: subzona de lomas y colinas y subzona de planicies de inundación. El barrio Mirador de San Juan se localiza en el inicio de la subzona de lomas y colinas, cuyo modelado se ha atribuido a la erosión diferencial y el efecto de las corrientes superficiales que cortan los depósitos cuaternarios, además de la actividad neotectónica que ha levantado dichos depósitos por encima del nivel base del valle actual. Por otro lado, cabe resaltar que en INGEOMINAS (2007), se presentan la zonificación geomorfológica realizada para el área de estudio donde se identifican 10 geofomas o elementos geomorfológicos de origen denudativo y antrópico (Tabla 4). No obstante, esta zonificación se realizó a escala 1:5000 y necesita ser actualizada, principalmente por los cambios realizados por el agente antrópico.

Tabla 4.

Elementos geomorfológicos identificados en el área de estudio. Adaptado de Ingeominas (2007).

Elementos geomorfológicos (EG)		
Origen	Nomenclatura	Nombre
Denudacional	D1	Cimas anchas
	D7	Escarpes denudacionales
	D10	Laderas muy inclinadas
	D11	Laderas moderadas
	D13	Depósitos coluviales
	D19	Tierras malas
Antrópico	A2	Laderas terrazadas
	A3	Llenos de escombros
	A9	Laderas explanadas
	A10	Corte vertical de laderas

4.1.5 Morfodinámica. Un movimiento de masa es toda aquella masa de roca, detritos o tierra que se desplaza pendiente abajo (Crudden, 1991). La importancia del estudio de este fenómeno para la planeación y organización de las actividades humanas radica en los deslizamientos afectan las geoformas, causan diversos daños ambientales y de infraestructura como destrucción de viviendas, puentes, bloqueos de ríos, etc (Suarez, 2009).

El hecho de que los procesos de remoción en masa son comunes para la gran mayoría de zonas geográficas del planeta ha generado el uso de diferentes terminologías y clasificaciones para referirse a estos, por tanto, al momento de iniciar un proyecto, se deben contextualizar y definir los términos y los sistemas de clasificación a ser usados. En este orden de ideas, el término “fenómeno de remoción en masa” tiene amplia aceptación en Colombia y es común sinónimo de deslizamiento o movimiento en masa (Suarez, 2009).

Debido a la adopción de las recomendaciones y lineamientos metodológicos de GEMMA (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas [PMA], 2007), el gobierno colombiano ha definido como sistema de clasificación el propuesto por Cruden y Varnes (1996). Este sistema muestra que los movimientos en masa se encuentran estrechamente relacionados con el tipo de material presente y la morfodinámica del mismo. El sistema establece una primera categoría de “tipo” asociada a la clase de movimiento en términos mecánicos, y una segunda categoría “subtipo”, que además de refinar el detalle de la categoría anterior, añade la clase de material involucrada en el movimiento (Tabla 5).

Tabla 5.

Clasificación de movimientos en masa de Cruden y Varnes (1996).

Clasificación de movimientos en masa

Tipo	Subtipo
Caídos	Caída de rocas (detritos o suelo)
Volcamientos	Volcamiento de rocas(bloque) Volcamiento flexura de roca o del macizo rocoso
Deslizamiento de roca o suelo	Deslizamiento traslacional, deslizamiento en cuña Deslizamiento rotacional
Propagación lateral	Propagación lateral lenta Propagación lateral por licuefacción
Flujo	Flujo de detritos Crecida de detritos Flujo de lodo Flujo de tierra Flujo de turba Avalancha de detritos Avalancha de rocas Deslizamiento por flujo o deslizamiento por licuación
Reptación	Reptación de suelos Soliflucción, geliflucción (en permafrost)
Deformación gravitacional profunda	

A continuación, se definen los principales movimientos en masa y sus características:

- Caída. Este tipo de movimiento ocurre generalmente en áreas de alta pendiente, donde la gravedad es el principal agente detonante. Consiste en el rápido desprendimiento de material litológico (5×10^1 mm/s), a lo largo de una superficie sobre la cual ocurre poco desplazamiento cortante (Figura 4). En el movimiento se da una interacción mecánica entre fragmentos individuales y su trayectoria, pero no entre los fragmentos en movimiento, lo cual lo diferencia de movimientos de tipos masivo y flujo (PMA, 2007).

Según la clasificación de Varnes (1978) en Vargas (2000), cuando el material es roca, se habla de caída de rocas, y cuando el material es suelo (suelos ingenieriles), se habla de caída de detritos para materiales gruesos y caídas de tierra para materiales finos.

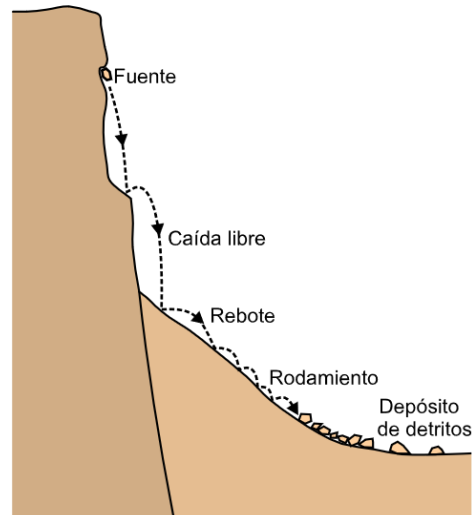


Figura 4. Esquema de caída de bloques. Tomado de PMA (2007).

- Volcamiento. El volcamiento o *toppling* es un movimiento donde se da una rotación hacia adelante de uno o varios bloques de roca o suelo alrededor de un punto o pivote de giro en la parte inferior. Los principales agentes detonantes de este movimiento son la gravedad, empujes adyacentes y presiones de fluido en grietas (PMA, 2007). Usualmente, este movimiento ocurre en unidades de roca, no obstante, también se puede presentar en suelos cohesivos secos y en suelos residuales. Hay un límite transicional entre los movimientos de volcamiento y de caída, definido por las características geométricas y la estructura geológica predominantes (Suarez, 2009).

En general se tienen dos tipos de volcamientos en función del mecanismo y del material litológico: vuelco de bloques y vuelco flexural (Figura 5). El vuelco de bloques es controlado por discontinuidades en los taludes y se les asocian altas velocidades de movimiento, mientras el vuelco flexural, se relaciona con rocas más frágiles y con mayor densidad de diaclasas, y velocidades lentas (PMA, 2007).

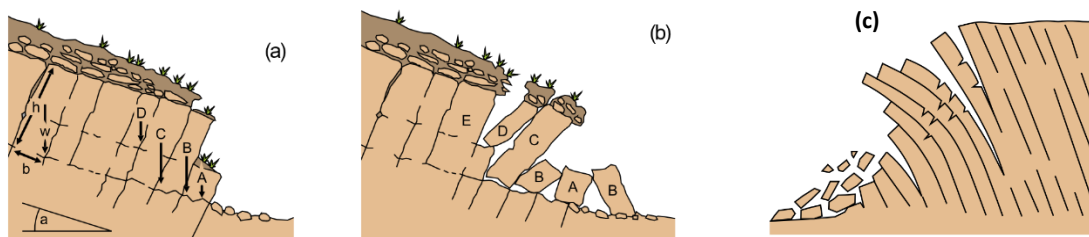


Figura 5. (a) y (b) Evolución de volcamiento de bloques. (c) Volcamiento flexural. Modificado de PMA (2007).

- Deslizamientos. Según PMA (2007), un deslizamiento o *slide* es un movimiento ladero debajo de una masa de suelo o roca a lo largo de una superficie de falla o zona de falla, donde ocurre una gran deformación cortante. Según el material involucrado el deslizamiento y sus relaciones con el movimiento, el fenómeno puede ser de una masa relativamente homogénea o de varias masas semi-independientes (Suarez, 2009). En base a la mecánica y a la forma de la superficie de falla, se tienen los deslizamientos rotacionales, traslacionales o planares y deslizamientos compuestos de rotación y traslación. Es importante definir el tipo de deslizamiento predominante, pues esto condicionará el método de análisis a usar.
 - Deslizamientos traslacionales. Este tipo de movimiento se da a lo largo de una superficie de falla relativamente plana, con movimientos de rotación o volteo mínimos. Los deslizamientos traslacionales están estrechamente asociados a discontinuidades en los materiales, como fallas, planos de estratificación, familias de diaclasas, foliaciones o contactos entre materiales de distintas propiedades mecánicas. En diversos casos estos

deslizamientos son fenómenos precedentes a movimientos tipo flujo, en especial en áreas con altas pendientes (Suarez, 2009)

- Deslizamiento rotacional. El deslizamiento rotacional ocurre sobre superficies de falla cóncavas hacia arriba, generándose un movimiento rotacional, donde el centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad de la masa litológica involucrada. Es importante mencionar, que, si bien la superficie de falla es comúnmente circular en materiales homogéneos, en zonas tropicales como la zona de estudio del presente proyecto, la superficie de falla no es necesariamente circular y se relaciona a la presencia de materiales residuales cuya resistencia al corte aumenta con la profundidad (Suarez, 2009).

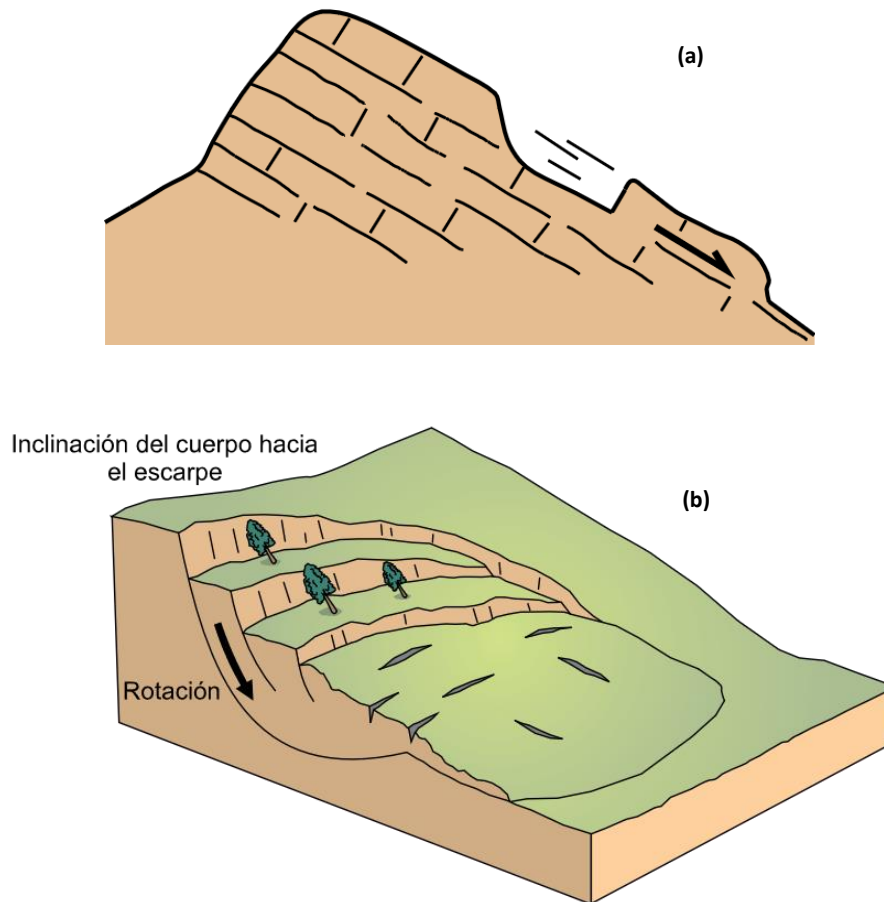


Figura 6. Tipos de deslizamientos. (a) deslizamiento traslacional. (b) deslizamiento rotacional.

Modificado de PMA (2007).z

- Propagación lateral. La propagación lateral o *lateral spread* es un movimiento en masa donde ocurre una marcada deformación interna del material litológico. Hay dos grandes tipos de movimientos de propagación lateral: la propagación lateral en estratos rocosos que suprayacen materiales blandos y las propagaciones laterales que involucran licuación de materiales sensibles, limos y arcillas sensitivas y arenas saturadas de densidad media a baja (figura 7). Los movimientos de la primera categoría se caracterizan por presentar bajas velocidades pues consiste en el fracturamiento y separación de bloques del estrato competente, mientras la segunda categoría se caracteriza por velocidades muy rápidas, pues incluyen licuación de

materiales. Esta última categoría se asocia comúnmente a terremotos y por su velocidad se consideran movimientos muy peligrosos.

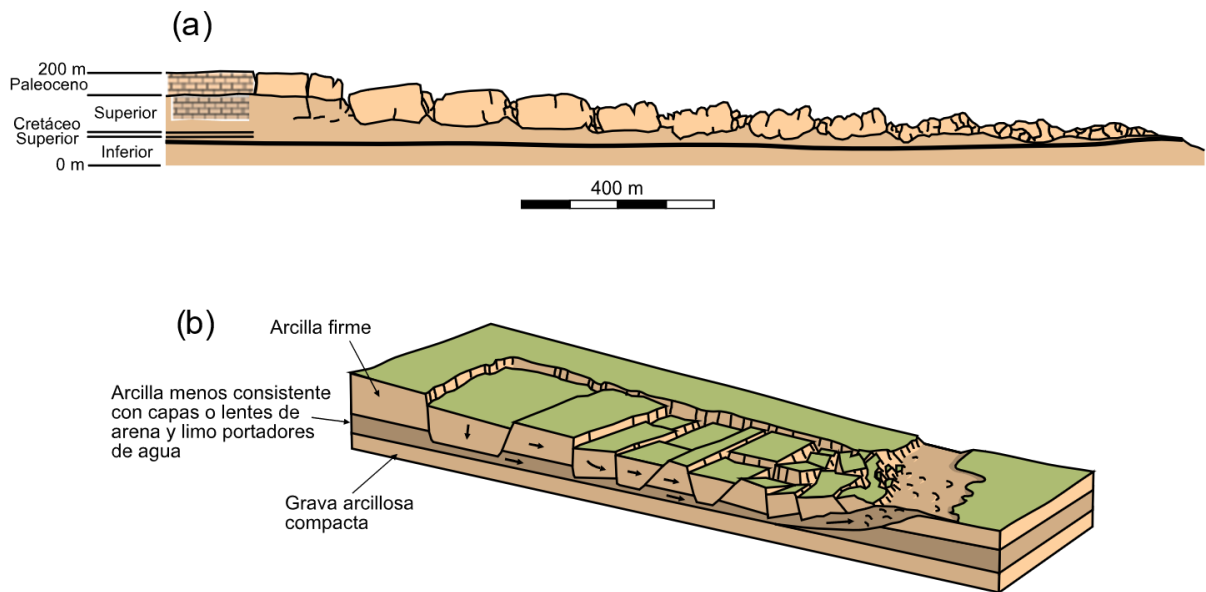


Figura 7. Tipos de movimientos de propagación lateral. (a) Propagación lateral en materiales rocosos. (b) Propagación lateral en materiales licuados. Modificado de PMA (2007).

- Flujo. El flujo es una clase de movimiento donde el material litológico se comporta como un fluido. Estos movimientos tienen velocidades variables al igual que grados de saturación de agua. Existen varias clasificaciones de los flujos (PMA, 2007), en función de la geometría se tienen flujos canalizados y no canalizados (figura 8) y en función del material involucrado y la mecánica del movimiento se tiene flujos de detritos (*debris flow*), crecida de detritos (*debris floods*), flujos de lodo (*mud Flow*), flujos de tierra (*earth Flow*), deslizamientos por flujo (*Flow slide*), avalanchas de detritos (*debris avalanches*), avalancha de rocas (*rock avalanches*). En general, los flujos son canalizados, mientras las avalanchas y crecidas no. Por otro lado, cada tipo de flujo tiene asociada un rango de áreas de influencia y un rango de velocidades, que

puede variar significativamente entre las clases, por tanto, es importante definir específicamente qué tipo de flujo predomina en la zona de estudio para abordar los análisis de amenaza por movimientos de remoción en masa.

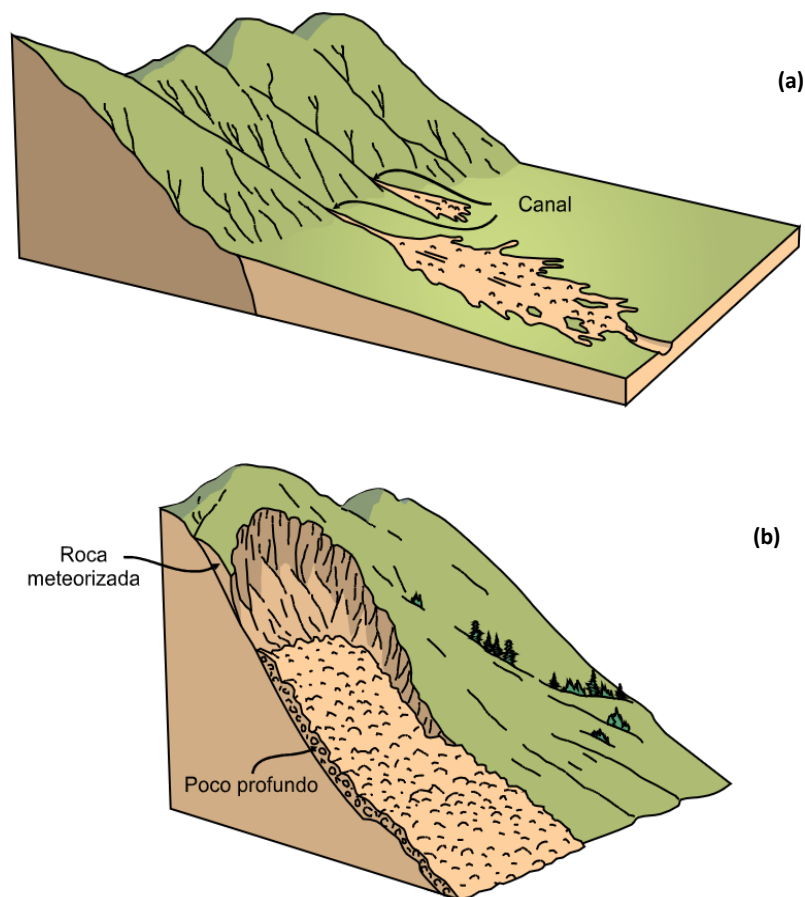


Figura 8. Tipos de flujo según su geometría o grado de confinamiento. (a) flujos canalizados. (b) flujos no canalizados. Modificado de PMA (2007).

- Reptación. La reptación o *creep* es un tipo de movimiento en masa superficial en materiales de baja cohesión, de baja velocidad donde la superficie de falla o deslizamiento no se distingue con claridad. En función de la temporalidad, puede haber reptación estacional,

asociada a los cambios de las condiciones de humedad, y reptación verdadera, cuando el desplazamiento es continuo (PMA, 2007). Dentro de la reptación, se categorizan algunos tipos de movimientos como la solifluxión y la gelifluxión. La solifluxión se desarrolla en zonas de alta humedad y baja temperatura, donde el movimiento se provoca por una diferencia en el comportamiento entre las capas superficiales y las profundas. Algunas geoformas como rugosidad del suelo, cabeceo de árboles, desplazamientos de cercas, morfología ondulada con abombamientos locales pueden ser indicadores de la ocurrencia de este fenómeno (Vargas, 2000).

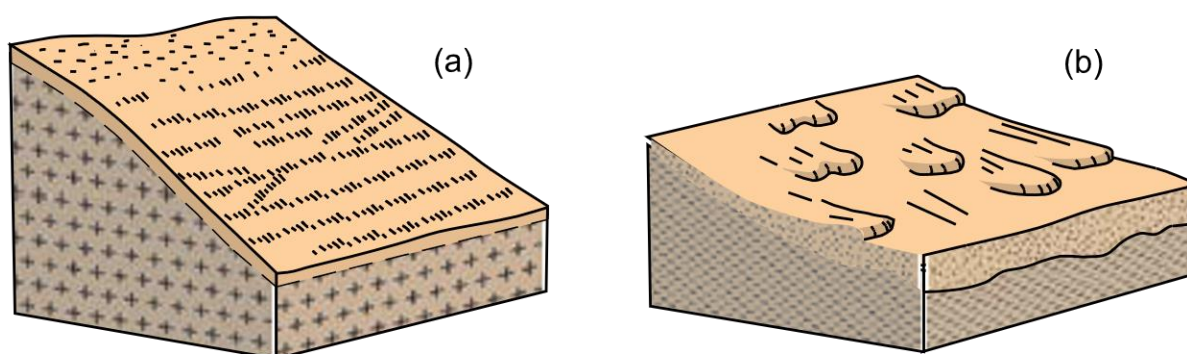


Figura 9. (a) y (b) esquemas de reptación y solifluxión en una ladera respectivamente. Modificado de PMA (2007).

4.2 Usos del suelo.

El uso del suelo es un término usado en gran medida por no decir que exclusivamente para referirse a la planeación de ciudades. Este término asigna una clasificación para cada zona, dependiendo de los criterios definidos (Guttenberg, 1959). El uso de suelo es la herramienta y uno de los criterios

en los cuales se basan los planes de ordenamiento territorial para realizar el plan de desarrollo de cada municipio.

La cobertura y uso del suelo son unas de las variables más importantes para tener en cuenta, especialmente en las zonas urbanas en donde la acción antrópica realiza cambios significativos en las condiciones naturales del terreno, los cuales pueden convertirse en agentes detonantes de movimientos de masa (INGEOMINAS, 2007). En términos más prácticos el término “uso” implica la utilidad que presta algún tipo de cobertura (termino que describe la vegetación presente, elementos antrópicos además de describir también los afloramientos de agua y cuerpos rocosos) al ser humano, el uso se relaciona con las actividades que se presentan en cierta porción de tierra y ejemplo de ello es el uso urbano, reserva natural, etc (Janssen 2000).

La zonificación de usos de suelo de Colombia se basa en la adaptación de la metodología europea Corine Land Cover (CLC), proceso que inicia en el año 2004 (IDEAM, 2012) a partir de la necesidad de unificar y armonizar las diferentes metodologías y leyendas de cobertura terrestre empleadas hasta el momento.

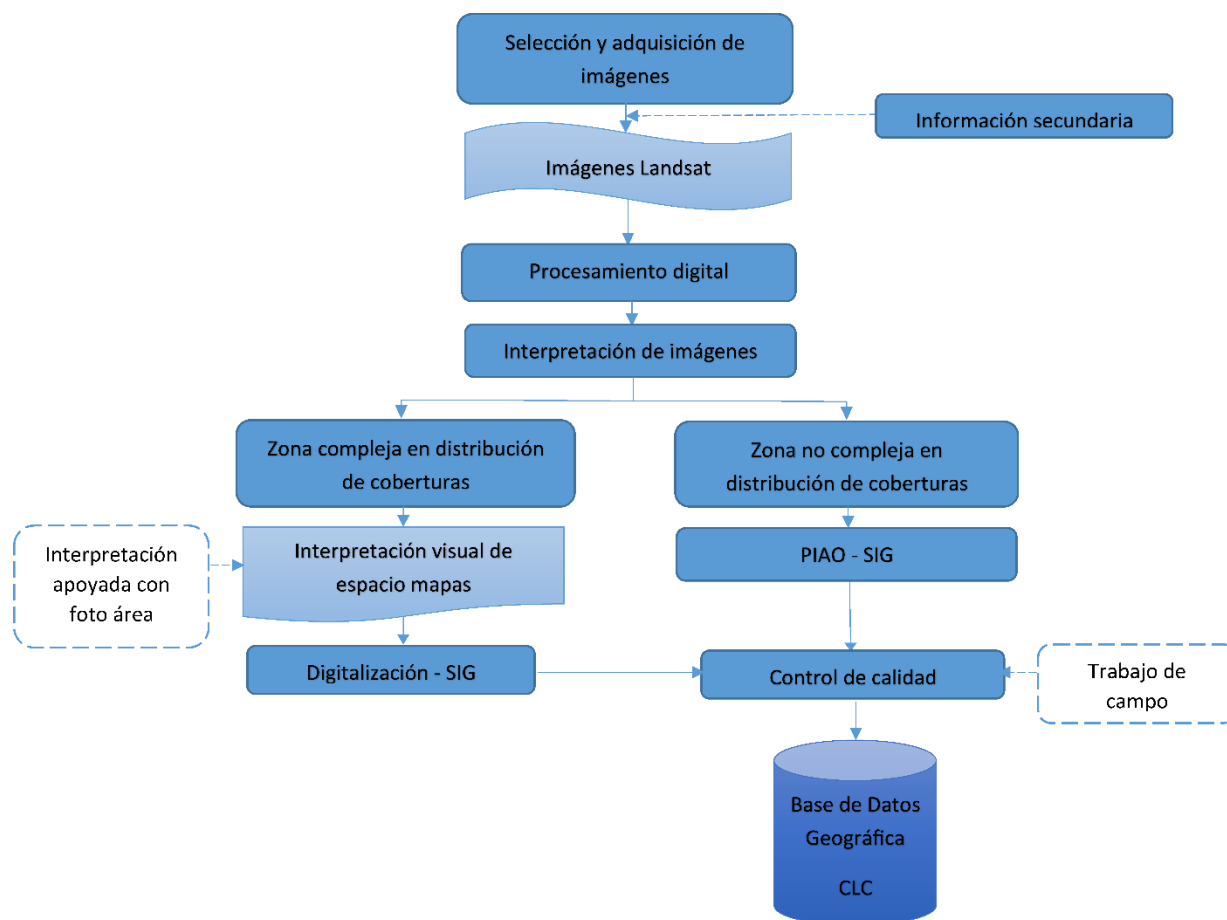


Figura 10. Esquema de representación del modelo general de la metodología Corine Land Cover. Tomado de IDEAM (2012).

En base a la metodología CLC se establecen pautas para que tanto las instituciones públicas como las instituciones privadas e intérpretes de cobertura, elaboren de forma estandarizada la reinterpretación, la cual consiste en la actualización de la información de la cobertura terrestre nacional. En esta reinterpretación se hace inclusión de nuevas unidades y el cambio o modificación de geometrías o límites de las ya existentes.

4.2.1 Antecedentes de zonificaciones de usos de suelo. Para el presente proyecto, se realiza una reinterpretación de la cobertura trazada por INGEOMINAS (2007). Esta cobertura sigue una metodología propuesta por el mismo autor (figura 11) y clasificaciones sugeridas por el Centro de

Investigación y Desarrollo CIAT del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), donde los parámetros definidos para calificar la cobertura y uso actual del suelo fueron infiltración al drenaje profundo, uso consultivo de las coberturas y profundidad de las raíces.

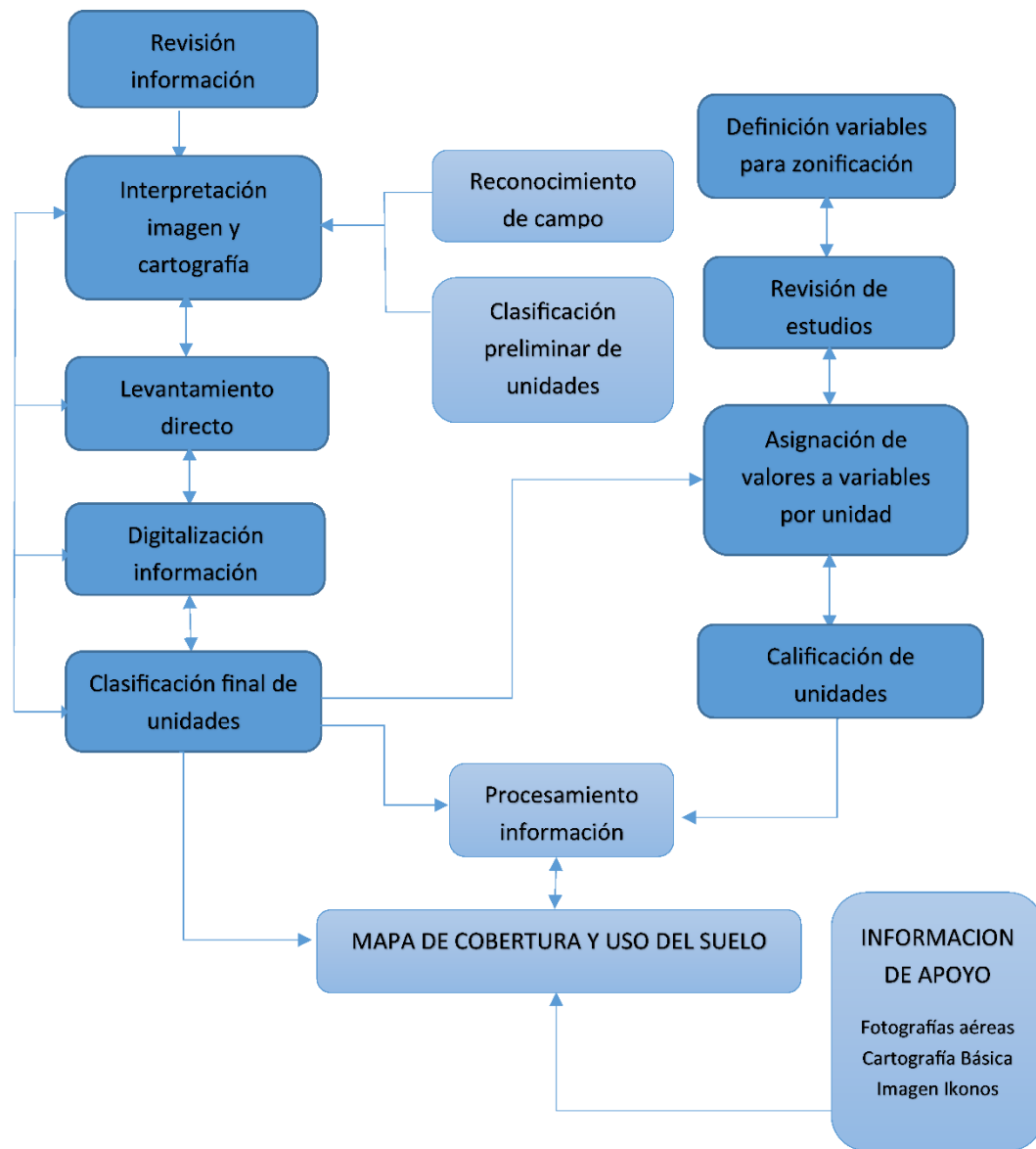


Figura 11. Esquema de representación del modelo usado para la clasificación del uso del suelo.

Tomado de INGEOMINAS (2007).

4.3 Geotecnia

Según la Norma sismo resistente- 10 (NSR-10), los estudios geotécnicos son el conjunto de actividades que comprenden el reconocimiento de campo, la investigación del subsuelo y los análisis y recomendaciones de ingeniería necesarios para la gestión de obras en contacto con el suelo, los cuales, para el caso de los estudios de amenaza por remoción en masa, permite determinar el comportamiento de los diferentes materiales del terreno y su susceptibilidad a movimientos en masa. De acuerdo con los alcances del estudio, se considera la primera categoría de estudios geotécnicos denominada según NSR-10 como Investigación del Subsuelo.

La investigación del subsuelo es definida como las actividades encaminadas al estudio y el conocimiento del origen geológico, la exploración del subsuelo y los ensayos y pruebas de campo y laboratorio necesarios para identificar y clasificar los diferentes suelos y rocas, como también cuantificar las características físico-mecánicas e hidráulicas del suelo. (NSR-10). Dentro de la investigación del subsuelo, se considera en este estudio lo concerniente a la exploración del subsuelo y a los ensayos de laboratorio.

- Exploración del subsuelo en campo: esta fase puede ser realizada por métodos directos o indirectos, donde los métodos directos corresponden a apiques, trincheras y sondeos entre otros, mientras que los métodos indirectos corresponden a técnicas geofísicas principalmente.
 - Sondeos geotécnicos: son perforaciones sobre el terreno caracterizadas por su pequeño diámetro y por la ligereza, versatilidad y fácil desplazamiento de las máquinas. Permiten atravesar cualquier material, así como extraer testigos de este. El tipo de sondeo a utilizar depende principalmente del tipo de materiales a investigar y de los

muestreos y testificación deseadas. Dentro de los sondeos más usuales se encuentran los sondeos a rotación, helicoidales y los sondeos a percusión.

Por otro lado, el número y profundidad de los sondeos son decisiones críticas en esta fase del estudio. De manera general, los sondeos deben alcanzar el nivel del sustrato más profundo afectado por los fenómenos a estudiar y el número de sondeos a realizar depende de los alcances de la investigación y de la representatividad de cada zona estudiada. Por último, los resultados de las operaciones de perforación junto con los datos de la testificación deben presentarse de manera ordenada en estadillos de campo. (González de Vallejo, et al., 2002).

- Ensayo de penetración estándar (SPT): es un método de amplio uso en el campo de la geotecnia por su fácil implementación, cuyo objetivo es determinar la compacidad¹, consistencia² y la capacidad de soporte de los suelos (Argüello & Calderón, 2014). En general consiste en contar el número de golpes necesarios para introducir un tubo o toma-muestras en el suelo a diversas profundidades para obtener muestras. El método ha evolucionado desde sus primeras implementaciones registradas en el año 1902, siendo objeto de diversas estandarizaciones para las longitudes y características de los materiales utilizados como el tubo toma muestras, las profundidades a las cuales se introduce y la energía usada en el proceso. Los resultados del ensayo SPT consisten principalmente en el número de golpes “N” para introducir el toma-muestras a determinadas profundidades y este parámetro “N” puede ser procesado para obtener

¹ Compacidad: propiedad de los suelos granulares definida como el grado de compactación de los suelos no cohesivos.

² Consistencia: propiedad de los suelos finos asociada al grado de adherencia y resistencia en relación con las cargas. Se define mediante los límites de Atterberg siendo los estados comunes: líquido, plástico, semisólido y sólido.

aproximaciones a datos de interés geotécnico como los son los parámetros de resistencia al corte como la fricción y la cohesión (Argüello & Calderón, 2014). En Álvarez & Sandoval (2012), se proponen ecuaciones que relacionan el valor N con el parámetro de fricción de muestras representativas de suelo de la Formación Bucaramanga.

- Ensayos de laboratorio: esta fase se consideran ensayos para la clasificación de las muestras como granulometría, humedad, límites y densidad y compactación, así como también ensayos de corte directo para determinar propiedades mecánicas de los materiales. Cabe aclarar que el método específico de realización de cada ensayo, así como las especificaciones de las máquinas involucradas dependen de las normas técnicas utilizadas.
 - Granulometría: este ensayo se hace con el objetivo de obtener la distribución por tamaño de grano de las partículas presentes en determinada muestra de suelo. Este ensayo es de principal importancia pues la mayoría de las clasificaciones, así como aplicaciones del estudio de suelos dependen de los parámetros arrojados por este ensayo. Se realiza mediante el uso de tamices normalizados y numerados, dispuestos en orden decreciente (Figura 12). La muestra disgregada se hace pasar por la columna de tamices y por último se pesa el contenido de muestra en cada tamiz, obteniendo así la distribución por pesos de la muestra (PUCV, 1998).



Figura 12. Equipo tradicional para ensayos de granulometría. Tomado de <http://mecanicadelossuelos.blogspot.com.co/p/analisis-mecanico-del-suelo.html>.

- **Humedad:** el objetivo de este ensayo es determinar el contenido de humedad de determinada muestra de suelo, el cual es la suma de sus aguas libre, capilar e higroscópica o molecular. Tradicionalmente el procedimiento se realiza por medio del secado a horno de la muestra, donde se relaciona el peso inicial de la muestra y el peso final de la misma, obteniendo la cantidad de humedad inicial. Este parámetro es de gran relevancia, especialmente para suelos de textura fina, pues ayuda a entender los cambios de volumen, cohesión y la estabilidad mecánica de los materiales. (PUCV, 1998).
- **Límites de Atterberg:** en los suelos que poseen cohesión, dependiendo su humedad y de su composición, pueden presentar un comportamiento de un material sólido, semi-sólido, plástico o semi-líquido. Por tanto, los contenidos de agua a los cuales estos cambios de estado ocurren son conocidos como límites de Atterberg. Los más comunes son el límite líquido (LL) entre los estados plástico y semi-líquido y el límite plástico (PP) entre los estados plástico y semi-sólido. Además, hay un tercer límite

conocido como el límite de retracción o consistencia (LC) entre los estados sólido y semi-sólido. También hay otro parámetro denominado índice de plasticidad definido por la diferencia entre LL y LP. (PUCV, 1998).

Estos límites se hayan para la fracción la muestra que pasa por el tamiz de 0,1 mm o N° 40 A.S.T.M. El LP se determina amasando el suelo seco con poca agua y formando elipsoides, haciendo rollos de los mismo con la palma de la mano sobre una superficie lisa, hasta llegar a un diámetro aproximado de 3 mm y una longitud de 25 a 30 mm. Si en el momento de conformar dicho cilindro con la muestra de suelo esta se resquebraja o se cuartea en fracciones de unos 6 mm, su humedad será el LP, si no, se agrega agua y se realiza de nuevo el procedimiento hasta que se resquebraje como se mencionó. Para determinar el LL, se utiliza el aparato de Casagrande (Figura 13), donde se amasa el suelo seco con bastante agua y se extiende sobre la cuchara de Casagrande, posteriormente en el centro del suelo extendido se abre un surco de aproximadamente 63 mm. Luego, se somete a golpes controlados y el LL se determina para la humedad que permita a la muestra de suelo cerrar el canal a aproximadamente 10 o 12 mm. (Gonzáles de Vallejo, et al., 2002).



Figura 13. Máquina o cuchara de Casagrande. Tomado de <http://proetisa.com/proetisa-productos.php?ID=178>.

- Densidad y compactación: en general este ensayo se aplica a muestras cuyo porcentaje de finos (material que pasa tamices de 0,074 mm o tamiz N° 200 A.S.T.M) sea igual o mayor que 12%. El objetivo principal de estos ensayos es determinar la relación humedad-densidad de un suelo compactado. En general el procedimiento se hace sobre una muestra de suelo compactada en un molde de dimensiones definidas mediante un pisón de masa determinada, en caída libre y con una energía de compactación definida, donde la compactación se entiende como el proceso mecánico por el cual determinado se disminuye la cantidad de espacios vacíos o porosidad de un material, lo cual aumenta su densidad. El ensayo se realiza para varias muestras con distintas humedades bajo la misma energía de compactación, obteniendo así la densidad máxima compactada seca o DMCS con su correspondiente humedad relacionada o humedad óptima. (PUCV, 1998).

- Corte directo: el principal objetivo de este ensayo es determinar los parámetros de resistencia al corte de determinada muestra del suelo, como son el ángulo de fricción (ϕ) y la cohesión (c). Para este fin se utiliza el aparato de corte directo, el cual, tradicionalmente es una caja dividida en dos horizontalmente, dentro de la cual ubica el material a analizar. Posteriormente se aplica una carga vertical de confinamiento (P_v) y luego una carga horizontal (P_h) que progresivamente aumenta, la cual origina el desplazamiento horizontal de la mitad móvil de la caja. (Figura 14).

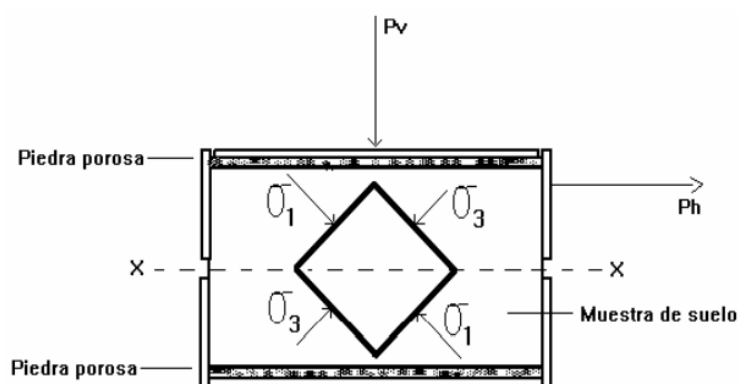


Figura 14. Esquema del ensayo de corte directo. Tomado de PUCV (1998).

4.3.1 Zonificación geotécnica. Las referencias a zonificaciones geotécnicas para el municipio tomadas del POT, se remontan a las realizadas en la zonificación sismotectónica realizada por Ingeominas (2001), donde se enmarca la zona de estudio dentro de la Zona 4B la cual se relaciona al miembro Órganos afectado por procesos erosivos, en general constituido por gravas arena arcillosas con gran contenido de cantos redondeados. En esta zona no se evidencian niveles freáticos subsuperficiales, sino profundos o acuíferos colgados sobre el basamento de la Formación Órganos. El principal problema geotécnico asociado a esta zona lo constituyen los intensos procesos erosivos actuantes, por lo cual en el estudio se señala que cualquier edificación ubicada

allí estará en grave peligro de ser afectada por procesos de inestabilidad y se recomienda la realización de estudios y diseños para estabilizar dichos procesos.

4.4 Zonificación de amenaza por fenómenos de remoción en masa.

Los movimientos en masa pueden ser definidos como todo desplazamiento de material litológico y o de escombros hacia abajo (en dirección del pie de una ladera) debido a la gravedad principalmente (Vargas, 2000). La clasificación que se usará para los movimientos en masa es la propuesta por Cruden y Varnes (1996), pues ha sido adoptada por las guías metodológicas del Servicio Geológico Colombiano referentes a este tema.

Por otro lado, la amenaza se define en la Ley 1523 de 2012 (Ley 1523, 2012) como el peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de modo accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.

La amenaza se obtiene tras considerar los factores condicionantes de inestabilidad y los factores detonantes. La primera categoría fue definida en apartados anteriores, mientras la segunda, al no ser tratada con detalle se definirá en este apartado, donde se consideran como factores detonantes los sismos y las lluvias.

Dentro de los principales objetivos del estudio de amenaza es realizar una zonificación de esta, es decir, definir segmentar la zona de estudio en áreas homogéneas en relación con el nivel real o potencial de amenaza. Para asignar valores o grados de amenaza a las diferentes zonas existen las técnicas relativas y las absolutas. Las técnicas relativas muestran las posibilidades de ocurrencia de fenómenos de remoción en masa en términos cualitativos, sin valores exactos, como es el

método heurístico y el análisis geomorfológico de campo, mientras las técnicas absolutas como las determinísticas y estadísticas presentan los grados de amenaza en términos cuantitativos (Suarez, 2009). Las técnicas relativas constituyen una herramienta para generar una primera aproximación a la zonificación, posteriormente, en función de los alcances y la escala del trabajo se procede a implementar técnicas cuantitativas como análisis estadísticos y determinísticos (Tabla 6). A continuación, se exponen las principales características y procedimientos asociados a los métodos heurísticos y determinísticos, pues son los utilizados para la zonificación de amenaza realizada.

4.4.1 Factores detonantes de inestabilidad.

4.4.1.1 Lluvia. El agua es el factor detonante al cual se asocian la mayoría de los deslizamientos. La causa de la activación de los deslizamientos radica que la infiltración del agua de lluvia satura los suelos, generando incrementos en la presión de poro, lo cual, a su vez, disminuye la resistencia al cortante (Suarez, 2002). El efecto de la lluvia se suele representar en los modelos determinísticos como la altura del nivel freático, el cual, para casos extremos se ubica sobre la superficie del terreno.

4.4.1.2 Sismos. Los sismos entendidos como fenómenos naturales causados por la dinámica de la corteza terrestre generan aumento en el esfuerzo cortante, aumento de presión de poros y deformación, lo cual resulta en la activación de múltiples deslizamientos. La amplitud de la onda, el contenido de frecuencias y la duración de los sismos son las principales características intrínsecas de estos fenómenos que tienen efecto en los deslizamientos. A continuación, se definen los principales términos asociados:

- **Aceleración sísmica:** es una medida que cuantifica los sismos en términos de la aceleración producida en el terreno. Este parámetro es medido con acelerómetros.
- **Aceleración Pico (PGA):** es el valor absoluto de la aceleración sísmica horizontal generalmente. Lo anterior debido a que comúnmente la aceleración pico vertical es igual a dos tercios de la aceleración pico horizontal, no obstante zonas muy cercanas al epicentro, las aceleraciones verticales pueden ser mayores que las horizontales. (Suarez, 2002).
- **Amplificación de la onda en el sitio:** se ha demostrado en varios estudios que dependiendo de las características de los materiales de cada lugar puede darse una amplificación de la onda sísmica. En general, los suelos blandos y la presencia de niveles freáticos generan una amplificación de la onda y un aumento de la aceleración y la amplitud de las deformaciones (Suarez, 2002).

Para el área metropolitana de Bucaramanga, Ingeominas (2007) utiliza para la elaboración de los modelos de estabilidad valores de PGA diferentes en función de las UGS, pues cada material tiene una respuesta sísmica local diferente. De esta manera, define para los suelos del miembro Órganos PGA de 0,3 g, para los llenos antrópicos de 0,65 g y para los suelos coluviales y flujos de escombros antiguos de moderada a alta compacidad de 0,45 g. De estos valores, se tiene la importancia que se debe dar a los rellenos antrópicos en relación con este parámetro, además, pues debido a su reología estos son más propensos a asentamientos, agrietamientos co-sísmicos y licuación de suelos (Suárez, 2002).

4.4.2 Método heurístico. Los métodos heurísticos o de combinación de mapas índice, se basan en la ponderación de diferentes mapas de factores condicionantes de la inestabilidad del área. Los parámetros por evaluar y las ponderaciones asignadas a cada parámetro se establecen de acuerdo con el criterio del experto que realiza la zonificación. Dentro de las ventajas de este método se

encuentra la relativa facilidad y rapidez de ejecución a diferentes escalas, y la principal desventaja la constituye la subjetividad intrínseca del método y la dificultad de su reproducción sin la supervisión del autor. En general, las diferentes capas o mapas índice son procesados en un software SIG, en el cual son llevadas a formato raster donde cada pixel tiene un valor asignado y posteriormente se realiza, mediante alguna herramienta de álgebra de mapas¹, una o varias ponderaciones de las capas de entrada para obtener la capa o mapa resultado de amenaza (Figura 15). Generalmente este proceso es calibrado con datos reales de campo como mapas morfodinámicos e inventarios de movimientos en masa. Por último, el resultado de este método será un mapa de zonificación de amenaza por movimientos en masa con rangos cualitativos de amenaza alta, media y baja.

¹ Álgebra de mapas: herramienta que permite realizar cálculos sobre una o varias capas generalmente en formato raster para obtener una nueva capa derivada del proceso.

Tabla 6.

Ventajas y desventajas de los principales métodos de evaluación de amenaza y las escalas idóneas de aplicación. Tomado de Alleoti, P., y Chowdhury, R (1999).

Métodos	Ventajas	Desventajas	Escala			Uso de SIG
			Regional	Mediana	Local	
Análisis de geomorfología de campo	Permite una evaluación rápida teniendo en cuenta un gran número de factores.	- Metodología totalmente subjetiva, uso reglas implícitas que dificultan los análisis críticos de los resultados. - No se manejan las propiedades intrínsecas de los materiales.	UR	P	P	Solo como una herramienta de dibujo
Análisis Heurístico	- Permite estandarizar el manejo de los datos.	Subjetividad en la atribución de valores de ponderación para cada parámetro.	UR	P	P	Superposición de diferentes mapas
Análisis estadístico (Bivariado y Multivariado)	Metodología objetiva - Permite estandarizar el manejo de los datos.	La colección sistemática y análisis de los datos de diferentes factores, puede resultar engorroso.	P	P	UR	Analisis
Factor de seguridad - Enfoque determinístico	- Es objetiva en la metodología y alcance. - Mide los parámetros geotécnicos en detalle. - Cuantitativa en su alcance.	- Requiere mayor detalle en el muestreo. - Se requiere amplia experiencia para definir el modelo geotécnico a usar.	UR	UR	P	Analisis

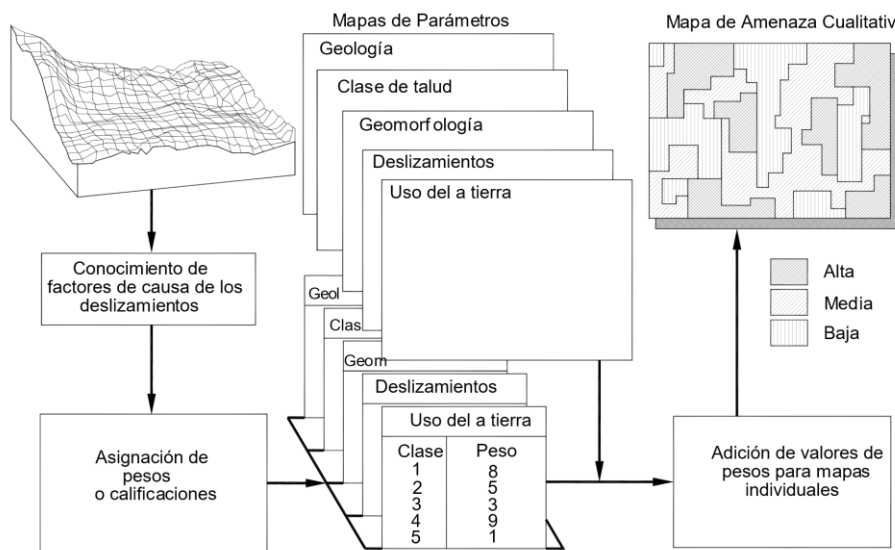


Figura 15. Metodología general del análisis del método heurístico para zonificación de amenaza. Tomado de Suarez (2009).

4.4.3 Métodos determinísticos. Los métodos determinísticos también conocidos en el ámbito de la geología ambiental como métodos de enfoque geotécnico consisten en el análisis de sitios específicos y/o de taludes, es decir, su uso es apropiado para escalas locales o detallada (Tabla 15). En este análisis las principales propiedades físicas como la geometría del talud, parámetros de resistencia al corte y presiones de poro son medidas y aplicadas a modelos matemáticos, de los cuales se obtiene un factor de seguridad. Luego de calcular el factor de seguridad para cada talud o área homogéneos, se puede elaborar un mapa de amenaza cuya variable, el factor de seguridad, es de carácter cuantitativo (Alleotti & Chowdhury, 1999). A continuación, se definen términos esenciales en el uso de métodos determinísticos:

- **Cargas:** se refiere a todos aquellos esfuerzos tanto verticales como horizontales que afectan el talud. Ejemplo de estas son las excavaciones, rellenos y cambios en nivel del agua del subsuelo.
- **Factor de seguridad (F.S):** representa el valor de amenaza que se requiere en el talud para que este falle; representado por la relación entre la resistencia al corte real y los esfuerzos al corte actuantes (ensayo de laboratorio) Fellenius (1992) en Suárez (2009).

$$F.S = (\Sigma \text{ resistencias disponibles al cortante}) / (\Sigma \text{ esfuerzos al cortante})$$

- **Nivel freático:** es la altura del nivel del agua subterránea, en donde la presión del agua es igual a la presión atmosférica.
- **Superficie de falla:** se asigna este nombre a la superficie en donde se presume podría ocurrir el deslizamiento (Figura 16). Por lo general son asumidas varias superficies de fallas para hallar la de menor factor de seguridad, la cual es denominada “superficie de falla crítica”.

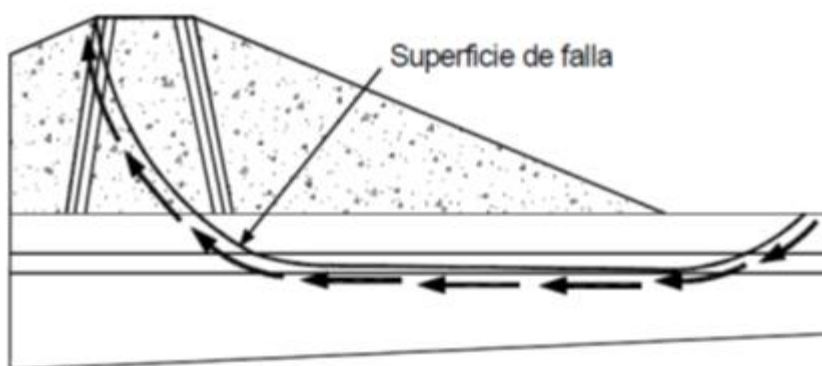


Figura 16. Superficie de falla y dirección de la resistencia al cortante. Tomado de U.S. Corps of Engineers (2003) en Suárez (2009).

De esta manera, el primer paso para la zonificación de amenaza por los métodos determinísticos es el análisis matemático de estabilidad de los diferentes taludes, cuyos principales objetivos son, según Suárez (2009):

- Determinar la estabilidad del talud.
- Determinar la potencialidad de falla.
- Analizar los mecanismos de activación del talud (lluvias, sismos, etc.).
- Estudiar la efectividad de determinada obra de estabilización sobre el talud.
- Diseñar las obras, para el caso de taludes artificiales a realizarse.

Para el análisis de estabilidad o modelado de taludes existen diversas técnicas (Tabla 7) y la elección de la técnica a usar se da en base a las características del sitio, al modo potencial de la falla (tipo de movimientos identificados), a la rigurosidad del proceso requerida y a la información disponible.

Tabla 7.

Diferentes metodologías usadas en el modelado de taludes. Tomado de Suarez (2009).

Método	Parámetros usados	Ventajas	Limitaciones
Límite de equilibrio	Topografía del talud, estratigrafía, ángulo de fricción, cohesión, peso unitario, niveles freáticos y cargas externas.	Existe una gran cantidad de paquetes de software. Se obtiene un número de factor de seguridad. Analiza superficies curvas, rectas, cuñas, inclinaciones, etc. Análisis en dos y tres dimensiones con muchos materiales, refuerzos y condiciones de nivel de agua.	Genera un número único de factor de seguridad sin tener en cuenta el mecanismo de inestabilidad. El resultado difiere de acuerdo con el método que se utilice. No incluye análisis
Esfuerzo-deformación continuos	Geometría del talud, propiedades de los materiales, propiedades elásticas, elasto-plásticas y de “creep”. Niveles freáticos, resistencia.	Permite simular procesos de deformación. Permite determinar la deformación del talud y el proceso de falla. Existen programas para trabajar en dos y tres dimensiones. Se puede incluir análisis dinámico y análisis de “creep”.	Es complejo y no lineal. Comúnmente no se tiene conocimiento de los valores reales a utilizar en la modelación. Se presentan varios grados de libertad. No permite modelar roca muy fracturada.
Discontinuos Esfuerzo-deformación elementos discretos	Geometría del talud, propiedades del material, rigidez, discontinuidades resistencia y niveles freáticos.	Permite analizar la deformación y el movimiento relativo de bloques.	Existe poca información disponible sobre las propiedades de las juntas. Se presentan problemas de escala, especialmente en los taludes en roca.

<p>Cinemáticos estereográficos para taludes en roca</p>	<p>Geometría y características de las discontinuidades. Resistencia a las discontinuidades.</p>	<p>Es relativamente fácil de utilizar. Permite la identificación y análisis de bloques críticos, utilizando teoría de bloques. Pueden combinarse con técnicas estadísticas.</p>	<p>Útiles para el diseño preliminar. Se requiere criterio de ingeniería para determinar cuáles son las discontinuidades críticas.</p>
<p>Dinámica de caídos de roca</p>	<p>Geometría del talud, tamaño y forma de los bloques y coeficiente de restitución.</p>	<p>Permite analizar la dinámica de los bloques y existen programas en dos y tres dimensiones.</p>	<p>Existe muy poca experiencia de su uso en los países tropicales.</p>
<p>Dinámica de flujos</p>	<p>Relieve del terreno. Concentración de sedimentos, viscosidad y propiedades de la mezcla suelo-agua.</p>	<p>Se puede predecir el comportamiento, velocidades, distancia de recorrido y sedimentación de los flujos.</p>	<p>Se requiere calibrar los modelos para los materiales de cada región. Los resultados varían de acuerdo con el modelo utilizado.</p>

A continuación, se expondrán las características y procedimientos de los métodos usados para el análisis deslizamientos rotacionales.

4.4.1.1 Falla rotacional: método de equilibrio límite. Como se observa en la tabla 7, cada método usa parámetros específicos de entrada para el modelo. Para el modelado geotécnico de los taludes en estudio, es usado el software Slide 5.0 de Rocscience, mediante el cual se realiza el análisis de la estabilidad utilizando métodos de equilibrio límite. Estos métodos requieren información de topografía del talud, estratigrafía, ángulo de fricción, cohesión y peso unitario de los distintos materiales, niveles freáticos y cargas externas. A partir de la información de entrada, el método analiza las superficies de deslizamiento y localiza la superficie de deslizamiento crítica de un talud dado.

Slide 5.0 modela de manera sencilla la geometría del talud, ya que este se basa en una interfaz gráfica CAD (computer-aided design) la cual cuenta con variadas opciones de interpretación de datos que permiten la realización de un análisis completo y rápido.

Metodología

La metodología por seguir para realizar el presente estudio fue proporcionada por el municipio de Girón. Esta metodología tiene la misma estructura presentada por la guía metodológica del Servicio Geológico (SGC, 2015), por lo que se complementan. El alcance y enfoque de este trabajo se centra en la primera etapa del estudio de amenaza, concerniente a la definición del modelo geológico-geotécnico con los parámetros condicionantes de inestabilidad, sin embargo, se realizó

un análisis y zonificación preliminar de amenaza, donde de manera general se consideró el efecto de la lluvia y los sismos como agentes detonantes de inestabilidad (Figura 17).

5.1 Fase I: Recopilación de información.

La recopilación de la información primeramente se dio desde el ámbito de búsqueda de bibliografía tanto metodológica relacionada a la realización de modelos geológicos y la elaboración de estudios de amenaza, como de estudios previamente realizados en los que se pueda fundamentar teóricamente el presente estudio, además de la revisión de la información provista por el municipio en forma de informes de estudios previos y mapas.

En este marco de ideas es de gran utilidad mencionar La Guía Metodológica Para Estudios De Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo Por Remoción en Masa (SGC, 2015), la cual es una ampliación de la norma establecida según el decreto número 1807 del 19 de septiembre del 2014 del ministerio de vivienda y desarrollo , donde se reglamentan todos los procedimientos básicos para el correcto estudio de la zona de interés, explicando con claridad la escala adecuada a trabajar, las unidades tanto geológicas y geomorfológicas a ubicar y toda una serie de recomendaciones sistemáticas a tener en cuenta, los cuales complementaron los lineamientos de este estudio.

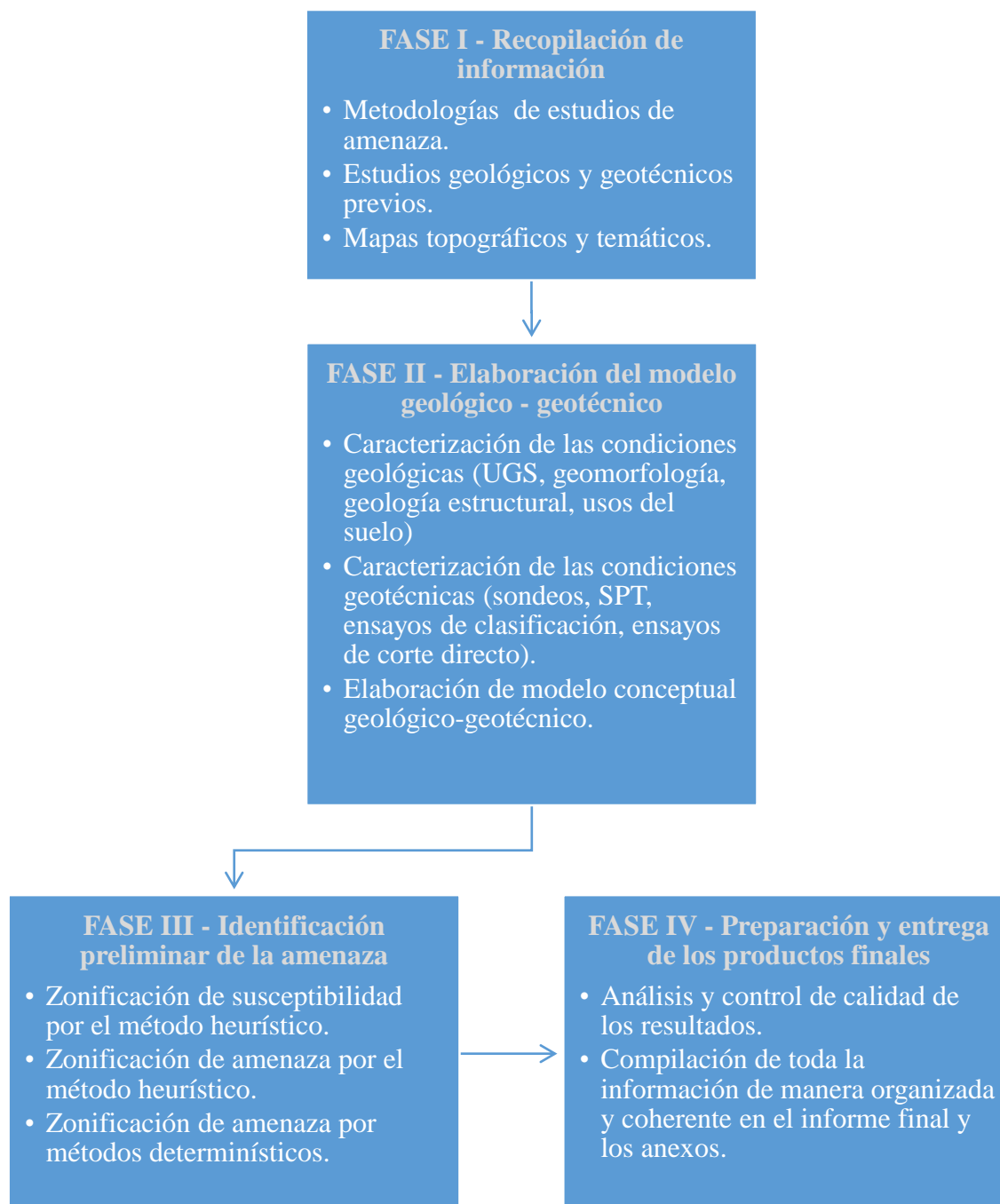


Figura 17. Flujo metodológico del estudio.

5.2 Fase II: Definición del modelo geológico – geotécnico.

Esta fase constituye el principal insumo aportado para el análisis de amenaza. Como primera medida se definió un polígono de trabajo considerando la morfología de la zona y las áreas de influencia en relación con los movimientos en masa. Luego de esto se dio inicio a dos etapas, la primera relacionada a la identificación y caracterización de las condiciones geológicas y la segunda en la caracterización geotécnica de las diferentes unidades identificadas en la primera etapa. Posteriormente, se integra la información previamente adquirida para consolidar el modelo geológico-geotécnico del área de estudio, donde en última instancia se establece la relación entre los rasgos geológicos y los procesos de inestabilidad. A continuación, se describen los diferentes parámetros estudiados para la conformación del modelo.

5.2.1 Condiciones geológicas. Estas características son el primer ítem para tener en cuenta para la elaboración de un adecuado modelo geológico-geotécnico, a continuación, se explica en que consiste cada una, para determinar que parámetros de cada característica se evaluaron:

5.2.1.1 Estratigrafía y unidades geológicas superficiales.

- Litología: en base a las zonificaciones realizadas en Ingeominas (2007, 2009) se realizó la descripción local de cada una de las unidades geológicas cartografiadas, en donde se determinó su extensión, espesores locales, orientación, distribución de las unidades superficiales, propiedades texturales, composicionales y estructurales de cada unidad. Dicha información se consignó en los formatos para caracterización de suelos del SGC (2015). Además, dicho formato permite incluir información cualitativa de gran utilidad para la valoración geotécnica de las mismas como humedad natural, permeabilidad, plasticidad, resistencia al corte no drenado para suelos finos, entre otras.

- **Estratigrafía:** en los lugares con buena exposición del material litológico se describió la secuencia estratigráfica, la disposición y tipo de intercalaciones presentes en la ladera que puede producir inestabilidad, con la respectiva disposición de los estratos.
- **Columna estratigráfica detallada:** se realizó una columna estratigráfica a escala 1:50 con la respectiva descripción detallada y coordenadas, incluyendo la descripción textural y composicional del material geológico en base a lo expuesto en el manual de sedimentología de la Universidad Industrial de Santander (Cruz & Caballero, 2007), correlación con nombre de formaciones ya aceptadas, espesores y caracterización del material homogéneo.
- **Facies sedimentarias:** a partir del análisis de los datos de la columna estratigráfica se identificaron las facies sedimentarias presentes en la zona de estudio y se relacionaron al posible ambiente sedimentario asociado.
- **Plano geológico detallado:** el plano geológico detallado es aquel en el que se plasmó toda la información sobre la ubicación, extensión y unidades litológicas presentes en el área de estudio con sus respectivos datos estructurales, a escala 1:2000.

5.2.1.2 Geología estructural. se describió en esta sección las zonas de falla y fallas presentes que afectan la zona. De esta manera se describieron los marcos estructurales regional y local en donde se definieron los sistemas de falla que afectan la zona de estudio.

Se identificaron las estructuras y orientaciones de los estratos sedimentarios presentes en el área. Estas orientaciones o datos estructurales fueron corregidos por la declinación magnética de la zona según la consulta realizada el 19 de noviembre del 2017 en calculadora de declinación del Centro Nacional Para Información Ambiental de Estados Unidos (NOAA). Para la latitud $7^{\circ} 4' 42,12''$ y longitud $73^{\circ} 10' 28,72''$ (talud sur) la calculadora arroja una declinación magnética $8^{\circ} 17' \pm 0,19^{\circ}$ W.

- Corte geológico: se elaboró un corte geológico representativo relativamente transversal al rumbo de las capas sedimentarias, con orientación ONO-ESE, con su respectiva ubicación en los mapas topográfico y geológico, en donde se represente la información de las unidades, las estructuras que les afecten, el tipo de contacto de una unidad respecto a la otra. Además, se relaciona la escala tanto horizontal como vertical del corte.

5.2.1.3 Geomorfología. Mapa de pendientes y morfometría: a partir del procesamiento de las curvas de nivel proporcionadas por el municipio a escala 1:2000 se generaron mapas de pendientes con los intervalos presentados en la tabla 8. La relación de dichas pendientes con los materiales se realiza en las zonificaciones geológicas (UGS) y geomorfológicas (EG) respectivamente.

Tabla 8.

Intervalos de pendientes utilizados para la caracterización del suelo por el Municipio de Girón.

Fuente Municipio de Girón.

Intervalo (%)	Intervalo (°)	Descripción del terreno
0 – 3	0 – 1,7	Plano
3 – 7	1,7 – 4	Ligeramente plano
7 – 12	4 – 6,84	Ligeramente inclinado
12 – 25	6,84 – 14,04	Inclinado
25 – 50	14,04 – 26,46	Ondulado
50 – 57	26,56 – 29,68	Fuertemente ondulado
57 – 70	29,68 – 36,87	Escarpado
70 – 100	36,87 – 45	Fuertemente escarpado
> 100	> 45	Extremadamente escarpado

- Geomorfología: en base a las zonificaciones realizadas por Ingeominas (2007, 2009) y a partir de trabajo de campo y del uso de sistemas de información geográfica se realizó una descripción y categorización de los elementos geomorfológicos presentes en la zona de acuerdo con los estándares publicados por el Servicio Geológico Colombiano. Para este fin, cada geoforma se caracteriza en términos de morfogénesis, composición litológica, morfodinámica, características de la red de drenaje y cobertura de suelo. Esta información se consignó en los formatos para la caracterización de geoformas en geomorfología aplicada del SGC. Por último, dichas unidades se cartografiaron en un plano geomorfológico detallado escala 1:2000.
- Morfodinámica: mediante el análisis de imágenes satelitales de Google Earth y trabajo de campo se identificaron los diferentes fenómenos de remoción en masa presentes en la zona y se llevó a cabo una caracterización de estos en términos del tipo de material, morfometría y EG relacionados, así como también se identificó el tipo de movimiento en base a la propuesta para caracterización de movimientos establecida en PMA¹ (2007) y adoptada en las directrices del SGC en esta área (Tabla 5).

Los resultados de las identificaciones y caracterizaciones de los movimientos en masa fueron organizados y consignados en un inventario y un mapa con el fin de calibrar los análisis de susceptibilidad a movimientos en masa de la zona de estudio. Esto también ayudó a determinar la ciclicidad y la abundancia de estos fenómenos en el terreno. De esta manera, el inventario contiene la ubicación y los tipos de movimientos en masa identificados, lo cual fue plasmado en el mapa de morfodinámica por procesos de remoción en masa.

¹ PMA: Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas

5.2.1.4 Usos del suelo.

- Elaboración de mapa de usos del suelo: el mapa de usos del suelo fue elaborado mediante la reinterpretación o actualización de las unidades definidas en INGEOMINAS (2007). Esta reinterpretación consiste en el cambio de límites de las unidades, en base a lo observado en imágenes satelitales de Google Earth y a datos de campo.
- Migración a sistema Corine land cover: en base al documento metodológico para el uso del sistema Corine Land Cover en Colombia (IDEAM, 2010), se propuso una migración de las unidades de usos de suelo definidas en INGEOMINAS (2007) al sistema de clasificación de usos del suelo Corine Land Cover y se realizó la cartografía de estas. Esta migración es preliminar pues las categorías se deben refinar a una escala mayor, acorde a la de este trabajo.

6.2.2 Condiciones geotécnicas.

- Sondeos: se recopiló y organizó la información de sondeos existente, y posteriormente se realizó una correlación con la información de unidades geológicas superficiales recopilada y adquirida en campo. A partir de la información de sondeos existentes se determinaron las características litológicas del perfil estratigráfico atravesado en términos de litología, nivel de meteorización, color y texturas y estructuras. Cada sondeo fue recibido con el debido soporte topográfico, georreferenciación y registro de perforación.
- Ensayos SPT: para cada sondeo se recibió información de ensayos SPT, sobre la cual se calcularon valores de resistencia al corte donde fue necesario para realizar el modelado geotécnico (Talud B), a partir de los datos del ensayo SPT realizados en los sondeos.
- Ensayos de laboratorio: se realizaron y recopilaron ensayos para la clasificación completa de acuerdo con el sistema unificado de clasificación (SUCS) por cada unidad litológica representativa identificada en la zona, además. Los ensayos en cuestión fueron de granulometría,

humedad, límites de Atterberg, densidad y compactación para las muestras analizadas en los laboratorios de la Universidad Industrial de Santander. También se realizaron ensayos de corte directo y posterior determinación de los parámetros de fricción y cohesión para las muestras seleccionadas de los taludes considerados.

5.3 Fase III: Identificación preliminar de la amenaza.

5.3.1 Identificación preliminar de la amenaza. En base al modelo geológico-geotécnico, relacionado principalmente a los factores condicionantes de inestabilidad, se realizó una identificación preliminar de la amenaza por movimientos de remoción en masa. Como primera medida, se elaboró una zonificación heurística de la susceptibilidad de la zona y posteriormente se procedió a evaluar mediante el método heurístico la amenaza para diferentes escenarios. Los escenarios considerados fueron: condiciones actuales o normales (sin sismos y sin lluvia), condiciones con lluvias anormales, condiciones con sismos anormales y condiciones con lluvias y sismos anormales. Los resultados de estas zonificaciones fueron presentados en mapas de zonificación de amenazas con categorías alta, media y baja.

Luego de identificar qué zonas presentan mayor amenaza a fenómenos de remoción en masa, se realizó un análisis determinístico por el método de equilibrio límite de 5 taludes del área de estudio para el mecanismo de falla rotacional principalmente, mediante el software Slide 5.0 de Rocscience. Estos análisis, también fueron llevados a cabo para los cuatro escenarios considerados en el método heurístico, donde la representación de lluvias anormales se realiza asignando saturaciones de máximo 0,5 en los materiales del talud en función de su predisposición a saturarse, pues en la información bibliográfica recopilada y en los sondeos de hasta 20 metros de profundidad, no se reportan niveles freáticos para la zona. Por otro lado, los sismos anormales se modelaron con una aceleración sísmica horizontal de 0,2 g según los lineamientos metodológicos

de la alcaldía de Giròn (Municipio de Girón, 2011). Estos análisis, fueron llevados a cabo bajo distintos métodos y arrojaron la superficie crítica con el mínimo factor de seguridad para cada escenario, lo cual permitió categorizar los taludes como taludes con amenaza alta, media o baja según los valores del factor de seguridad.

5.4 Fase IV: Preparación y entrega de los productos finales.

La última fase consistió en el análisis, control de calidad y compilación de la información obtenida. Luego de esto del análisis y control de calidad de los resultados generados en el estudio, se procedió a integrar en el documento final la información correspondiente a cada fase de la metodología planteada anteriormente para la realización del estudio preliminar de zonificación de amenazas por remoción en masa a escala detallada.

Además del informe, se anexaron los mapas generados en el estudio (Topográfico, UGS, pendientes, EG, morfodinámica, usos del suelo y de zonificación de amenaza, entre otros), los estudios geotécnicos en los que se basaron los modelos, los formatos de caracterización detallada litológica y geomorfológica de los diferentes materiales presentes, la libreta de campo, las columnas estratigráficas detalladas y los modelos de estabilidad elaborados.

Cada uno de estos procedimientos se analizará a lo largo del informe, así como los resultados obtenidos a partir de estos procedimientos. Toda la información de unidades, tanto geológicas como geomorfológicas serán plasmadas en mapas en donde se reconocerán el tipo de estructuras presentes y sus respectivas características, además de llegar a un resultado final que será un modelo de comportamiento geotécnico y un mapa de susceptibilidad de la zona de estudio.

Resultados

6.1 Condiciones geológicas – geotécnicas.

6.1.1 Condiciones geológicas. A continuación, se muestran los resultados de los estudios realizados para las condiciones geológicas del modelo geológico-geotécnico de la zona de estudio.

6.1.1.1 Litología y Unidades geológicas superficiales (UGS). El reconocimiento y caracterización preliminares de estas unidades se realizó en base a trabajo de campo y comparación con la literatura existente (Ingeominas 2007, 2009). En general, todas las UGS corresponden a unidades de suelo ya que se constituyen de materiales granulares no cementados y arcillas plásticas, condiciones establecidas en el área de geología para ingeniería. A continuación, se exponen las descripciones de las UGS presentes en el área de estudio.

Los coluviones son masas incoherentes de materiales sueltos y heterogéneos, de suelos y/o fragmentos de roca angulares a subangulares, depositados por la gravedad, lavado de la lluvia o movimientos en masa. Estas unidades se caracterizan por estar constituidas de materiales clasto-soportados o matriz soportados según el origen de los sedimentos, su tamaño de grano varía desde grava hasta bloques de 1,5 m de diámetro, con consistencia muy baja a baja en coluviones recientes y media a alta en coluviones antiguos y meteorización intermedia a alta. (Ingeominas, 2007). Cabe resaltar que, debido a su origen coluvial, se genera un contacto discordante a la base de estas unidades, lo cual constituye una zona de debilidad geomecánica.

- Suelos Coluviales Recientes (Sco1): Los coluviones recientes se asocian a depósitos de ladera y a movimientos en masa que presentan actividad o han tenido movimiento en épocas recientes. Son inconsolidados, permeables, con fragmentos poco alterados, susceptibles a ser erosionados (Ingeominas, 2007).

Esta unidad aflora en la estación SJ-13, hacia el occidente del barrio sobre la ladera sur del mismo constituyendo una depresión topográfica. La cartografía de esta unidad se realizó en base a la geomorfología y a la cartografía geológica existente, analizando la morfología del terreno e imágenes satelitales multitemporales donde se evidencia su continuidad, previa a la construcción de las viviendas. No se logró obtener descripciones directas sobre propiedades composicionales ni texturales de la unidad debido a su difícil acceso y a la densa cobertura vegetal, no obstante, esta densa cobertura vegetal da indicios de una baja actividad morfodinámica. Por otro lado, al catalogarse esta unidad como coluvión, reposa discordante sobre el segmento gravoso, del miembro órganos de la formación Bucaramanga.



Figura 18. UGS Sco1. Se evidencia densa cobertura vegetal y depresión topográfica asociadas.

- Suelos Coluviales Antiguos (Sco2): Los coluviones antiguos se caracterizan por presentar buena compactación, los fragmentos se encuentran alterados y no han presentado movimientos recientes (INGEOMINAS, 2007).

Esta unidad aflora en la estación SJ-8, en el límite del barrio mirador de San Juan con el barrio Carrizal, expuesta a lo largo de un escarpe topográfico, compuesta por depósitos que varían de matriz soportados en matriz areno limosa y clasto soportados por gravas de distintos tamaños, desde gránulos hasta bloques, predominando los tamaños medios de guijas y guijarros. Su estructura interna caótica y los contrastes en tonalidades constituyen un factor clave para diferenciarlos de los depósitos de la Formación Bucaramanga en campo. De igual manera que con

la anterior unidad, en base a su origen coluvial, se da un contacto discordante con la Formación Bucaramanga.

Suelos originados principalmente en ambientes de muy alta energía, constituidos por depósitos pobremente calibrados. Predominan las estructuras acanaladas en las capas, especialmente en las gravas de mayor tamaño. Es común la intercalación con niveles de materiales finos arenosos y arenolimosos.

- Suelo Gravoso del Miembro Órganos (Formación Bucaramanga) (Sft3): Depósito matriz soportado conformado por bloques y cantos redondeados de arenisca cuarzosa de grano fino, micácea, con grado de alteración moderada, friables. Se observan fragmentos de limolitas rojas alteradas, bloques de esquistos, cantos de cuarzo, conglomerados y cuarcitas frescas; este material está dispuesto caóticamente, la matriz es limoarcillosa de color gris claro, con tintes marrones y rojizos de alteración, altamente erodable.

Dentro de estos depósitos se presentan lentes con espesores variables entre 1 y 3 m de espesor, con extensiones laterales que alcanzan varias decenas de metros. Estos lentes se componen de arcillas limo-arenosas que lateralmente varían a arenas gravosas, con líticos, plagioclasa, micas esporádicas y restos de materia orgánica; de consistencia dura y afectados por surcos. Expuesta en escarpe que limita el barrio Mirador de San Juan con el barrio Bellavista (INGEOMINAS, 2007).



Figura 19. UGS Sft3 en el talud sur del barrio.

Esta UGS aflora en las estaciones SJ-1, SJ2, SJ3, SJ5, SJ7, SJ8, SJ9, SJ10, SJ12 y SJ14. Cubre la mayor parte del área de estudio con aproximadamente 89% del área.

A partir de la columna estratigráfica que se levantó en el talud que separa el barrio Mirador de San Juan del barrio Bellavista, se determina que esta unidad geológica superficial tiene cuatro litologías homogéneas asociadas.

La primera litología asociada son depósitos de gravas de granulos y guijarros arenolodosas, matriz soportadas, con presencia de humedad, permeabilidad alta y presencia tanto de fisuras como de grietas.

La segunda litología presente en esta unidad es definida como gravas con presencia de guijarros y guijas arenosas con una textura clastosoportada, con presencia de humedad y permeabilidad alta. Una tercera litología clasificada denominada como arenas finas, de textura

matrizsoportada, con presencia de humedad permeabilidad de alta a intermedia y presencia de grietas y fisuras.

La cuarta litología identificada como arenas gruesas con armazón intermedio, presencia de humedad, alta permeabilidad y presencia de grietas y fisuras.

Cabe resaltar que la mayor parte de las litologías presenta inversiones texturales en el sentido de Folk (1974 en Cruz & Caballero, 2007) donde se evidencian clastos de arenas y gravas, redondeados a subredondeados y en algunos casos bien calibrados en matrices con altos contenidos de arcilla como es el caso de las litologías de la base de la columna A1. Esto puede ser atribuido al origen en ambientes fluviotorrenciales que se ha atribuido a estas unidades.

No se observa el contacto con el miembro de la formación Bucaramanga infrayacente, mientras el contacto con el segmento arenoso suprayacente del miembro órganos es concordante.

- Suelo Arenoso del Miembro Órganos (Formación Bucaramanga) (Sft4): Corresponde a un suelo areno limo arcilloso, color blanco amarillento, grisáceo claro, con tamaño de grano medio a fino, rico en cuarzo, feldespatos y líticos, de formas subangulares a subredondeados, con buena selección, clastosoportado, matriz limoarcillosa.

Además de la litología antes mencionado, en la estación SJ-4, sobre el talud sur del mismo, aflora esta unidad con una litología de color rojizo, característico por presentarse en la zona más expuesta y de mayor altura de la zona.

A partir de la descripción detallada de esta formación se clasifican dos litologías, de material fino, la primera litología se clasifica como arenas finas arcillosas, de textura matriz soportado con presencia de humedad y permeabilidad de baja a media.

La segunda litología identificada se clasifica como arenas finas, de textura matriz soportado con presencia de humedad, permeabilidad de baja a media y presencia de grietas y fisuras.

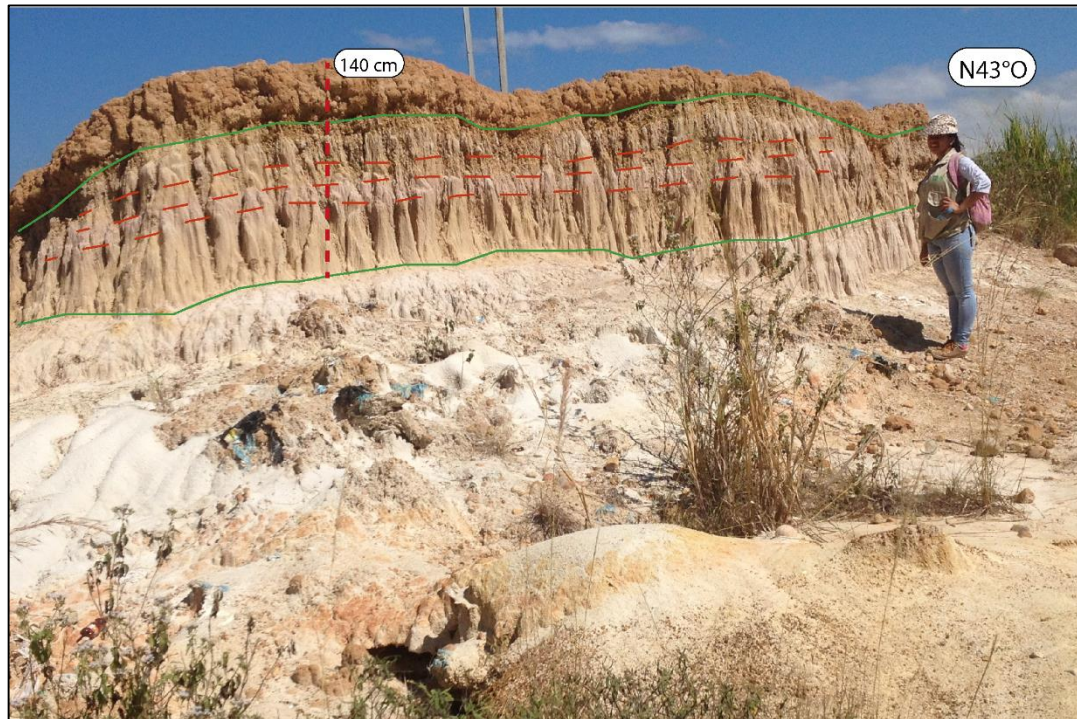


Figura 20. UGS Sft4. Afloramiento en la parte más alta de la zona, se evidencia suelo altamente erosionado por la exposición a los agentes denudativos.

- Suelo Arcilloso del Miembro Órganos (Formación Bucaramanga) (Sfl3): Conformados por arcillas arenosas laminadas, color gris verdoso, amarillentas, de consistencia firme, con intercalaciones de niveles arenosos, gravosos. La arena es de grano fino a medio color gris claro, cuarzosa, con buena selección y consistencia firme. Zona de los chircales, se observan taludes verticales que son explotados para obtener la materia prima necesaria en la elaboración de ladrillos, tubos y tejas. Se presentan como lentes o bolsas de hasta 20 m de espesor, donde se intercalan niveles de arcilla arenosa, de color gris cremoso, amarillento a rojizo hacia el tope. Se intercalan niveles arcillosos con gravas redondeadas a subredondeadas, conformadas por cuarzo lechoso y líticos (Ingeominas, 2007).

Se encuentra expuesto en la vía de acceso a barrio Bellavista. Expuesta en la zona adyacente al puente del barrio carrizal en el borde de la carretera que va en sentido oeste-este.

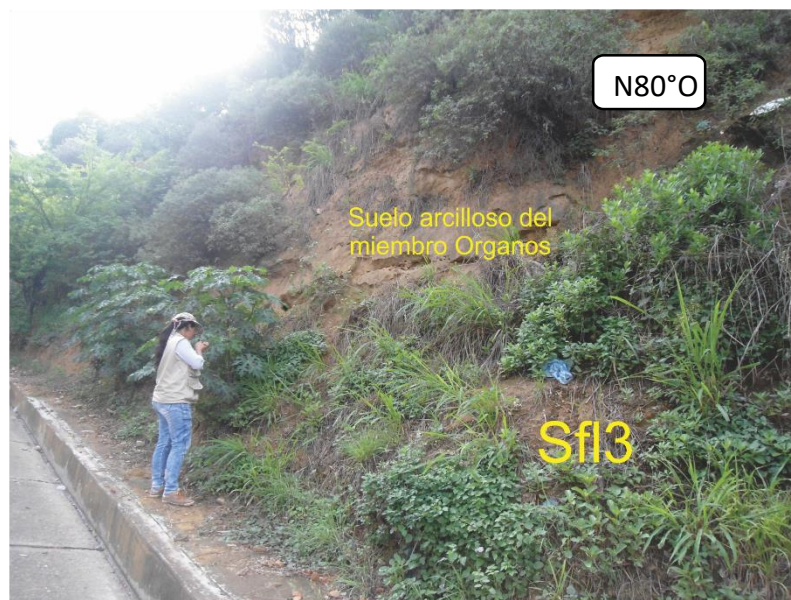


Figura 21. UGS Sf13 en afloramiento en la entrada al barrio Bellavista, adyacente al sur de la zona de estudio.

- Suelos de Flujos de Escombros Antiguos (Sfe1). Caracterizado por depósitos clastosoportados, con predominio de bloques y gravas subangulares a subredondeadas, con poca matriz, coloración grisácea oscura a marrón, rojiza y ocre, dependiendo del grado de oxidación. El tamaño de los bloques puede sobrepasar el metro de diámetro y se componen principalmente de areniscas moderadamente meteorizadas. La matriz intersticial es de arena media a gruesa, compuesta principalmente por cuarzo, feldspatos y partículas de rocas moderadamente meteorizadas, moscovita en laminillas y algunos máficos (Ingeominas, 2007). Material identificable en la entrada de conjunto residencial La Hacienda, adyacente al drenaje que limita el barrio en el margen oeste, además de presentarse en el talud principal de la entrada del barrio Mirador de San Juan.

A partir de la descripción detallada de esta unidad superficial, expuesta en varios lugares del área de estudio, como en la estación SJ-7 (figura 21), SJ-10 y SJ-14, se evidencia que está constituida texturalmente por un armazón intermedio con matriz arenosa no plástica, presentando baja humedad, alta permeabilidad, sin presencia de estructuras identificables. Presenta una calibración mala con rangos de clastos entre gránulos y cantos. El tipo de suelo asociado es grueso con alta densidad y clastos semiangulares a semiredondeados con orientación isotrópica. El contacto infrayacente de esta unidad con el miembro órganos es discordante.



Figura 22. UGS Sfe1. Afloramiento de la unidad en el Talud principal en la entrada del barrio Mirador de San Juan.

En la revisión presentada en Ingeominas (2009) esta unidad aparece mapeada como Sfe2 o suelos de flujos de escombros recientes, no obstante, en base a que no se reporta este cambio en el informe y a que la descripción de la UGS Sfe2 incluye que los depósitos se localizan a lo largo de los valles de quebradas (no aplica para la zona de estudio), se considera que este cambio en la cartografía es un error de digitación.

- Suelos de Llenos Antrópicos (Sla): Corresponden a materiales heterogéneos dispuestos por el hombre, generalmente caóticamente y sin ningún tratamiento o adecuación, con el objeto de cumplir los requerimientos de los diseños de obras de ingeniería o con la intención de aprovechar áreas de cauce de drenajes. Están compuestos principalmente por materiales tamaño arena, arcilla, grava y son producto de residuos de construcción, excavaciones para minería o para adecuación de terrenos. Se incluyen los rellenos de basura (Ejemplo: El Carrasco) (Ingeominas, 2007).

Se encuentra expuesto en el interior del barrio, en la zona donde se encuentran sitios usados para disposición de material reciclable. Además, en una zona donde antes de la urbanización se encontraban laderas de un drenaje que disectaba la zona en sentido SO-NE (Figura 24), fue dispuesto este tipo de material para acondicionar el terreno a la construcción de las viviendas, por su naturaleza antrópica presenta un contacto discordante sobre la formación Bucaramanga.

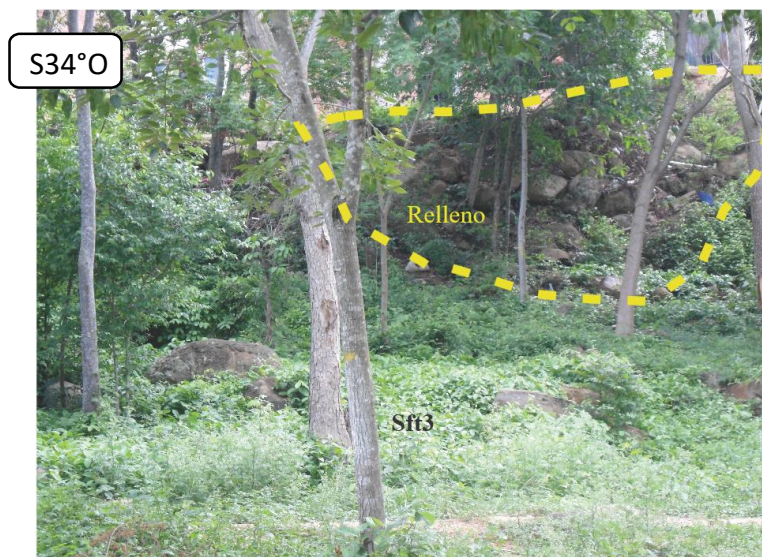


Figura 23. UGS Sla, sobre la ladera norte del barrio.



Figura 24. Imágenes satelitales multitemporales mostrando la evolución del lleno antrópico al interior del barrio sobre un antiguo cauce de drenaje. A (2002), B (2005), C (2009) y D (2015). Tomado y modificado de Google Earth.

Luego de identificar las UGS se realizó la cartografía de estas (Figura 24), donde se pudo evidenciar entre otros factores la distribución espacial las UGS dentro del área de estudio (Figura 25). En estas figuras se puede apreciar la dominancia espacial de la UGS Sft3, seguida por las UGS Sla y Sfe1, a las cuales se les atribuyen altos grados de inestabilidad (Ingeominas, 2007).

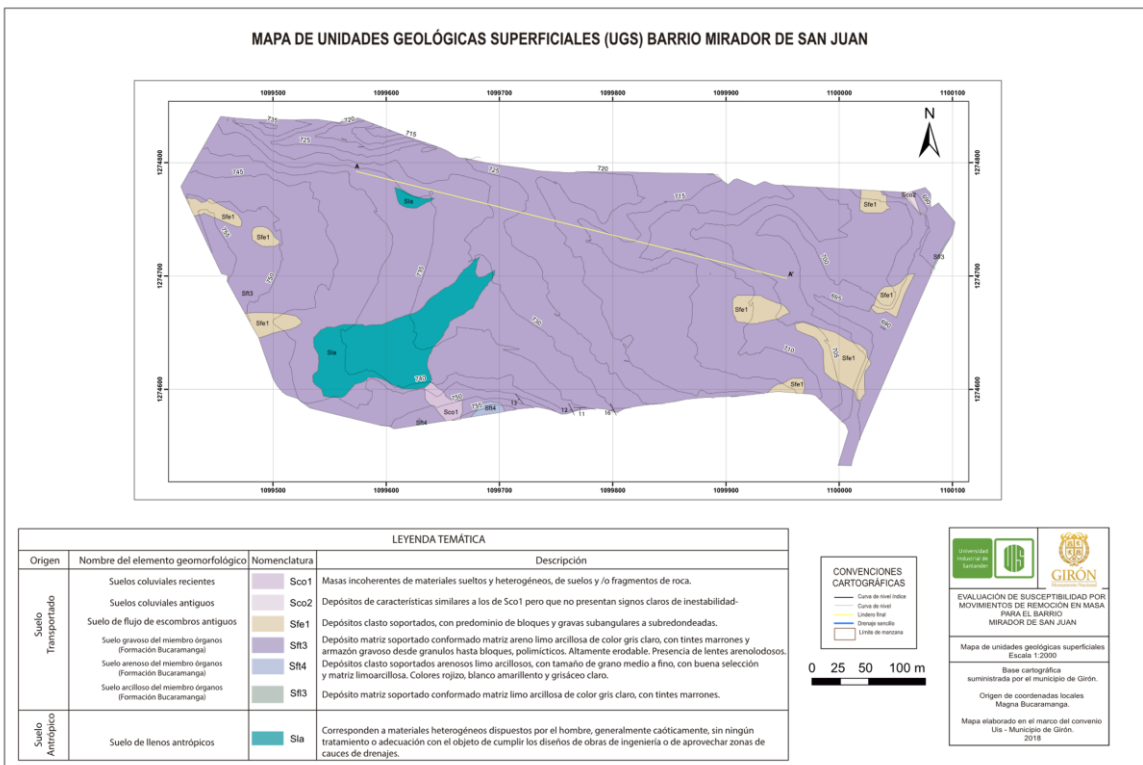


Figura 25. Mapa de unidades geológicas superficiales.

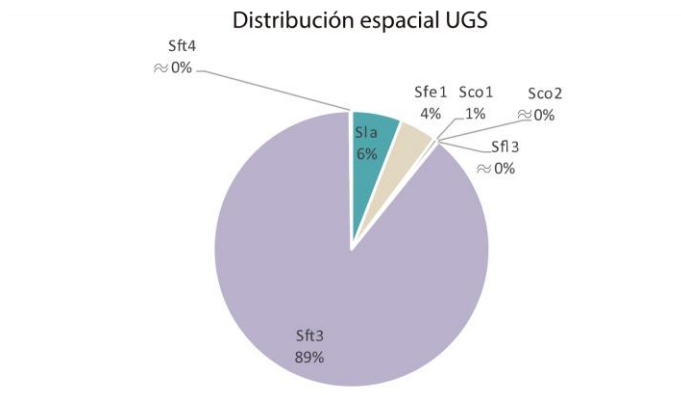


Figura 26. Distribución espacial UGS.

7.1.1.1.1 Columnas estratigráficas. Se levantaron 3 columnas estratigráficas a escala 1:50 en la ladera sur del barrio mirador de San Juan, sobre el suelo gravoso del Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga (Sft3). Debido a la falta de continuidad que generan las estructuras acanaladas de las capas de esta UGS, se dificultó levantar una columna continua para todo el talud.

La primera columna se levantó en una única localidad por su corta extensión horizontal, con coordenadas de inicio 1274601 m N y 1099641 m E...

La segunda columna con coordenadas de inicio 1'274.576 m N y 1'099.807 m E y de fin 1'274.589 m N y 1'099.683 m E, presenta gravas en su parte superior, intercaladas con algunas capas de arenas, clasto soportadas, a la base se encuentra material más fino por lo que se clasifica la columna como una secuencia grano creciente en general; más aun así a lo largo de la columna se observa secuencias agradacionales, tanto en arenas como en gravas. En la base de la columna se observa una secuencia grano decreciente hasta el metro 4.5, una secuencia granocreciente sigue hasta el metro 8, le siguen secuencias agradacionales de pequeña escala hasta el metro 24, seguido a esto se presentan 4 metros de cubierto, suprayaciendo se presenta una pequeña secuencia granodecreciente seguida de otra secuencia decreciente de mayor extensión hasta el final de la columna aquí descrita.

La distribución de las zonas de meteorización va relacionada con el tipo de litología siendo el material limoso más propenso a meteorización biológica, el material más arenoso y el gravoso presenta un menor grado de meteorización por la ausencia de materia orgánica en su composición.

El material es de una consistencia friable a media, debido a que en general son depósitos no consolidados. Se podrá encontrar una descripción y caracterización más detallada de dicha columna en el Anexo B.

Por último, la tercera columna con coordenadas de inicio 1'274.586 m N y 1'099.919 m E y de fin 1'274.577 m N y 1'099.850 m E, con un espesor de 6,5 metros presenta dos litologías predominantes en arreglos granocrecientes, a la base se compone por arenas finas lodosas con intercalaciones de arenas medias ligeramente granulares suprayacidas en contacto erosivo por las litologías gravosas que conforman el tope de la columna. Dichas litologías gravosas varían entre gravas de gránulos arenolodosas a gravas de guijas arenolodosas, presentándose en estructuras con formas de canales. Cabe resaltar que, hacia la base de la columna, sobre los materiales finos se encuentran viviendas de hasta 3 plantas y el talud en esta zona presenta una altura de aproximadamente 2 metros, con desarrollo de suelos de entre 20 y 30 cm, además las pendientes tienden a ser verticales.

7.1.1.1.2 Definición de facies sedimentarias. Las facies se pueden definir como cuerpos de características litológicas, estructurales y biológicas, que difieren de los cuerpos adyacentes (Walker,1992). En el presente trabajo se realizó una identificación de facies a partir de la interpretación de las diferentes características litológicas representadas en las columnas estratigráficas levantadas en la zona de estudio y posteriormente en base a la revisión bibliográfico se determinó, de manera general, el ambiente sedimentario asociado a estas facies.

- **Facies Gravas arenosas masivas (F1):** en la columna estratigráfica A1Z2 y A1Z3 se identifican variadas litologías, esta primera facie se caracteriza por su tamaño de grano grava por poseer una estructura masiva y un mal a moderado calibrado (figura 26). Esta facies incluye las litologías grava de guijarros arenolodosa, grava de gránulos arenolodosa, grava de guijas arenosa, grava de guijarros arenolodosa, gravas de guijarros arenosa.

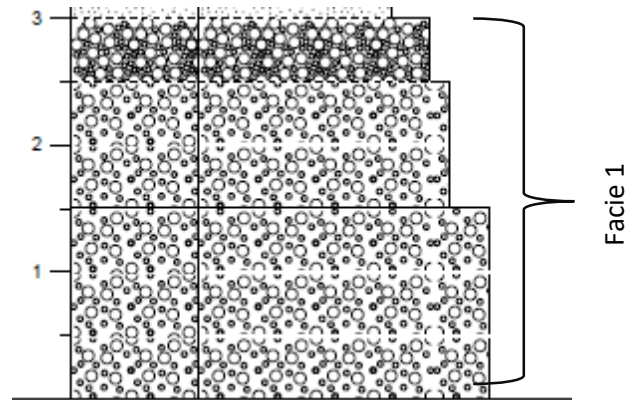


Figura 27. Facies Gravas arenosas en la base de la columna A1 Z2-Z3.

- **Facies Arenas gruesas a finas (F2):** facies caracterizadas por su tamaño de grano arena, además de su color característico en tonos amarillos crema a grisáceos y su predominante buen calibrado (Figura 27).

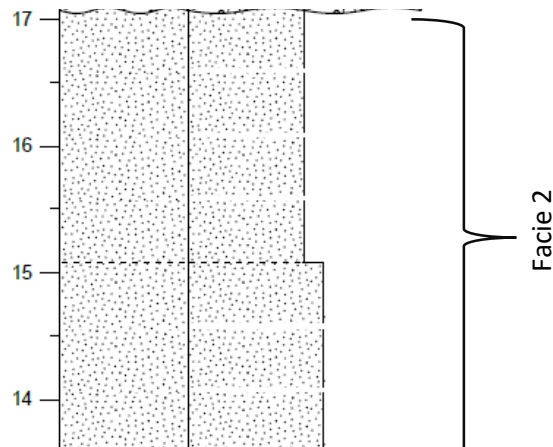


Figura 28. Facies Arenas gruesas a finas en la columna A1 Z2-Z3.

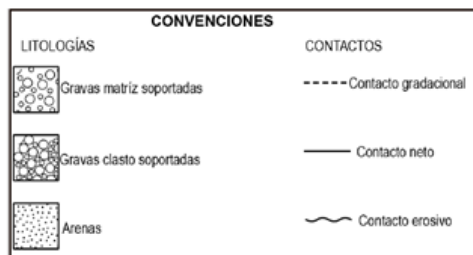
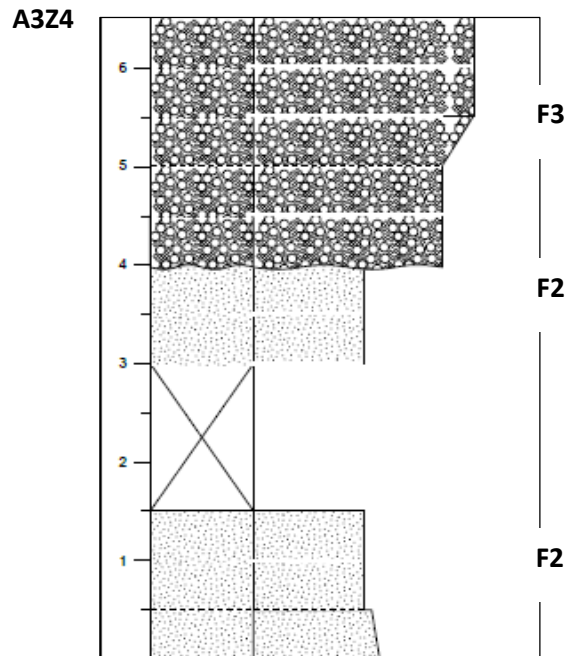
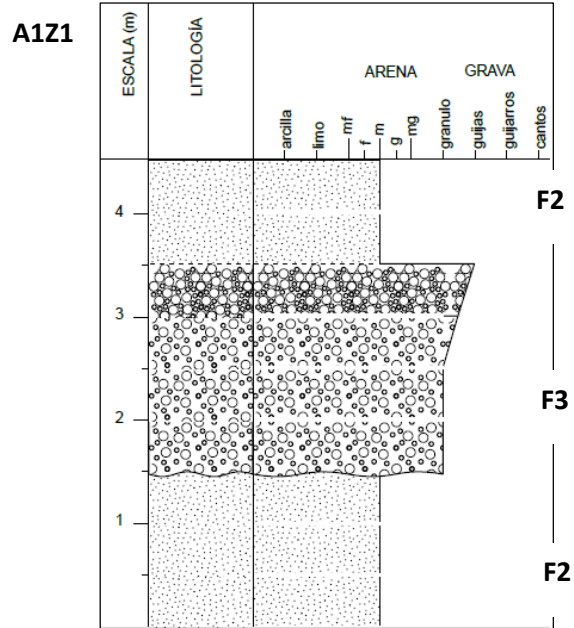
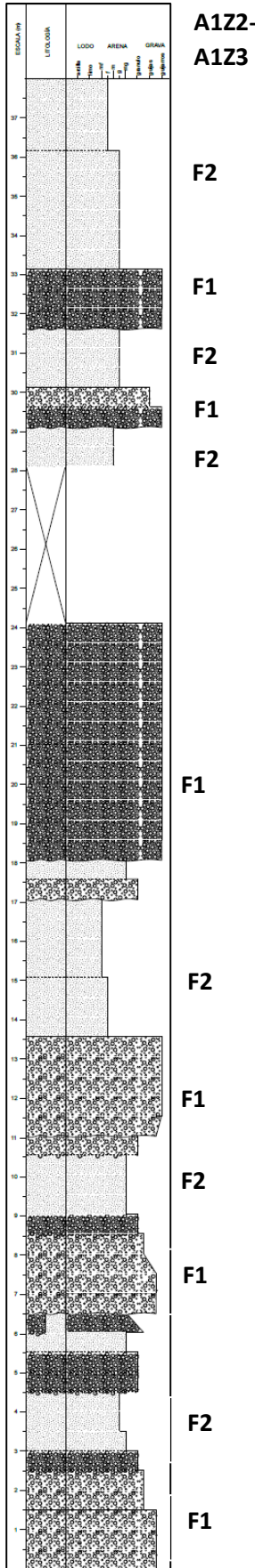


Figura 29. Representación de las columnas estratigráficas A1Z1-A1Z2, A1Z3 y A1Z4 y la ubicación de las facies identificadas. F1: Facies gravas arenosas, F2: Facies areniscas gruesas a finas y F3: Facies Gravas arenosas lenticulares.

- Facies gravas arenosas lenticulares (F3):** caracterizadas por presentar una secuencia granocreciente, además de presentar estructuras sedimentarias lenticulares (canales), incluye las litologías grava de gránulos arenolodosa, grava de guijas arenosa, además presenta un mal calibrado y posee en la base un contacto erosivo como se observa en la figura 29. Se evidencian en las columnas A1Z1 y A1Z4.



Figura 30. Contacto erosivo de estructura sedimentaria lenticular en la facies F3.

En base a la información bibliográfica consultada, en donde se determina que la Formación Bucaramanga es un depósito aluvial y su geoforma características se define como un abanico aluvial (Ingeominas, 2009), se propone que el área de estudio se ubica en lo que se denominaría el pie del abanico aluvial de Bucaramanga esto inferido por la asociación de facies características, por su predominancia gravosa y por las facies presentes en la columna A1 y A3, donde las geometrías lenticulares (canales) de las estructuras sedimentarias y las tendencias granocrecientes

representan la parte alta o zona interna del pie un abanico aluvial (Colombo,2010 en Arche, 2010) (Figura 30) , en este caso el Abanico Aluvial de Bucaramanga.

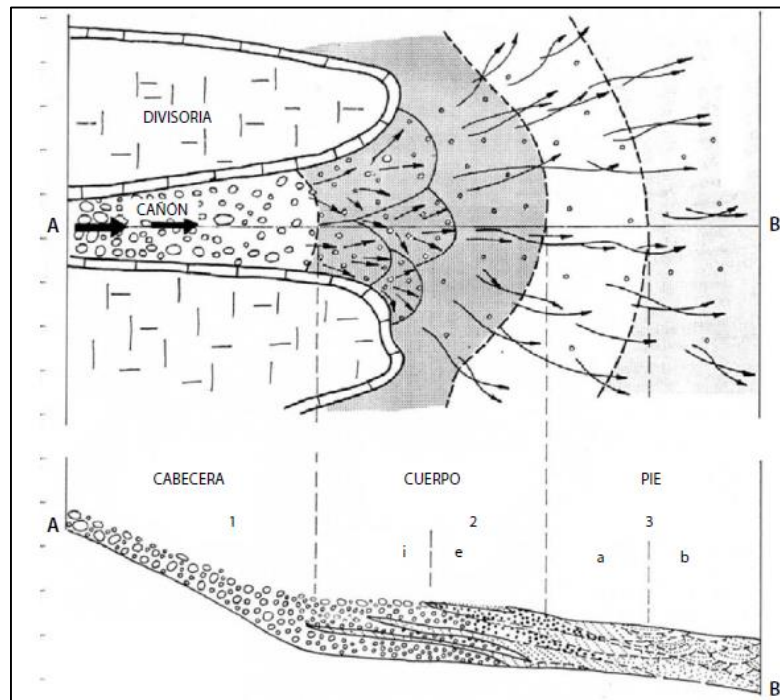


Figura 31. Planta esquemática y sección transversal de un abanico aluvial, señalando las partes que se divide esta geoforma. Tomado de: Sedimentología del proceso físico de la cuenca, Arche, 2010.

6.1.1.2 Geología estructural. En la zona de estudio no se logró identificar zonas afectadas por neotectónica, debido principalmente a la dificultad que se presenta en la identificación sobre unidades sedimentarias no consolidadas. No obstante, a partir de los datos estructurales adquiridos sobre algunas capas de las columnas del talud A1 (ver anexos de columnas estratigráficas y mapa geológico), se determinó que, para la zona de estudio, las unidades sedimentarias de la Formación Bucaramanga presentan en general buzamientos de entre 11 y 16 grados hacia el suroeste, con variaciones locales identificadas en las capas con estructura lenticular (canales).

Para representar la orientación de la geología subsuperficial se elaboró un corte A-A' en dirección W-E en la parte sur del área de estudio (Figura 31), pues en esta zona se cuenta la información de los sondeos mecánicos. La ubicación espacial del corte geológico se puede observar en la en el mapa geológico (figura 24). En base a los sondeos se pudo establecer que la zona atravesada por el corte presenta un relleno antrópico (Sla) de en promedio 4 metros de espesor. Infrayaciendo al relleno antrópico se encuentran sedimentos de las UGS Sft3 y Sfl3, para los cuales se infirió un contacto concordante, en base a las orientaciones observadas en campo. Al contacto mencionado anteriormente se le asignó un buzamiento acorde con los datos estructurales adquiridos en las columnas estratigráficas levantadas, y fue corregido en el corte debido a la exageración vertical usada para su representación.

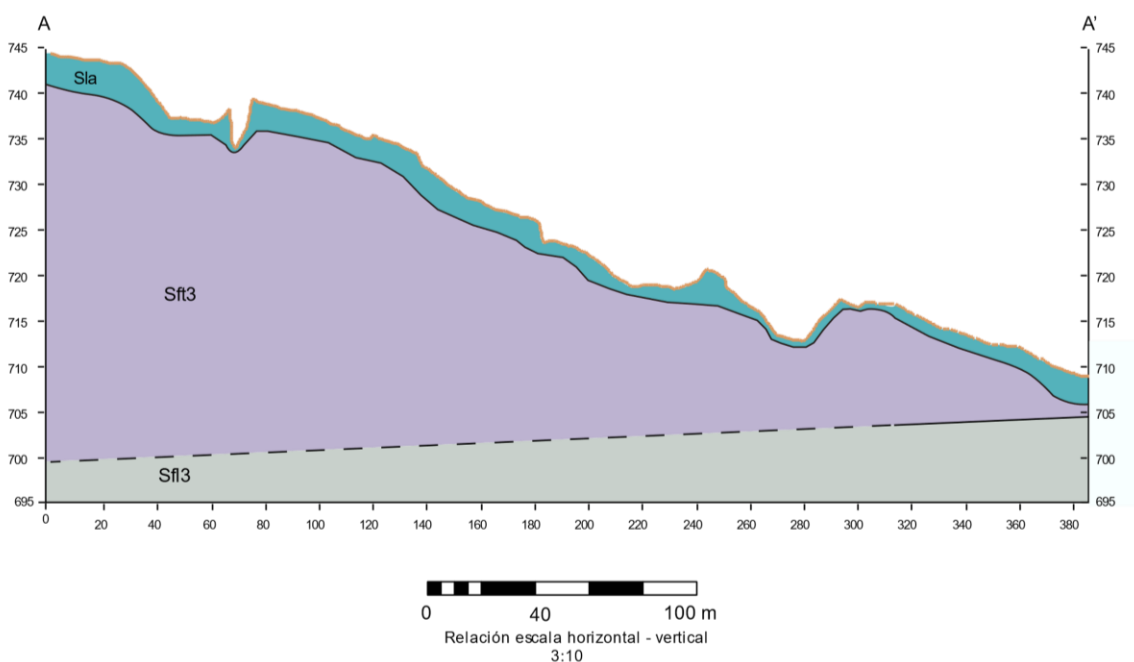


Figura 32. Corte geológico A-A' de la zona de estudio.

6.1.1.5 Geomorfología y elementos geomorfológicos. Se realizó para el área de estudio una zonificación de elementos geomorfológicos (EG) en base a la escala de trabajo (Figura 3). El reconocimiento se llevó a cabo por medio de imágenes satelitales (Google Earth), análisis de mapas de pendientes (Anexo A) y trabajo de campo. De esta manera, en el marco de la jerarquización geomorfológica propuesta en Carvajal (2004; 2012) y en base al POT (Municipio de Girón), se categorizó el barrio geomorfológicamente como se muestra en tabla 9.

Tabla 9.

Jerarquización geomorfológica del barrio Mirador de San Juan.

Jerarquización geomorfológica del barrio Mirador de San Juan	
Zona Geoestructural	Sistema Orogénico Andino
Provincia	Cordillera Oriental
Región	Zona de mesas denudacionales
Unidad	Valle intermontano aluvio – diluvial
Subunidad	Ladera denudada

En relación con los EG, la categorización subsiguiente a “Subunidad”, el primer parámetro a considerar para la zonificación es la morfogénesis donde se distingue entre elementos de origen denudacional y elementos de origen antrópico, posteriormente en cada clase se realizó una discriminación más detallada de los EG en base a la morfometría y a la morfogénesis.

Cabe resaltar que se han evidenciado cambios notables respecto a la cartografía existente (Ingeominas, 2009), relacionados principalmente a la acción antrópica, que a su vez se relaciona al acondicionamiento del lugar para el asentamiento humano. El resultado de este reconocimiento y caracterización se plasmó en los formatos para caracterización de geofomas en geomorfología aplicada del SGC (2015) y en el mapa de geomorfología (Anexo A). Dichos EG se describen a continuación:

Los elementos denudacionales son unidades relacionadas con los procesos denudacionales dominantes en las zonas de clima tropical. Para el área de estudio, se destacan los procesos erosivos llevados a cabo por el agua en forma de precipitaciones y escorrentía superficial controlando la erosión, transporte y depositación de los materiales que generan este tipo de geoformas. (Ingeominas, 2007).

- Cimas anchas (D1). Corresponden a cimas de elevaciones naturales del terreno, de naturaleza plana a semiplana, a partir de las cuales divergen laderas en todas las direcciones. En la zona de estudio se evidencia este tipo de geoformas al suroeste del barrio (Figura 32), desarrolladas en la UGS Sft3 evidencian pendientes dominantes de entre 11° y 20° , índice de relieve muy bajo (< 50 m), forma de ladera rectilínea y forma de la cresta plana. Presentan drenajes dendríticos con baja densidad y baja frecuencia. La cobertura del suelo se categoriza dentro de suelo desnudo con algunos herbazales. En cuanto a la erosión domina la erosión laminar y en surcos con intensidad suave. Por último, debido principalmente a las bajas pendientes no se evidencian movimientos en masa asociados a esta geoforma.

Cabe resaltar que esta geoforma progresivamente disminuye su área por diversos factores. Entre dichos factores se encuentran los procesos de urbanización y los procesos erosivos de formación de surcos y cárcavas asociados a las laderas adyacentes de altas pendientes y a la naturaleza friable de los materiales.



Figura 33. EG D1. Corresponde a la parte más alta de la ladera sur del barrio.

- Escarpes denudacionales (D7). Constituido por laderas con pendientes dominantes superiores a 70° , asociadas a macizos rocosos y a depósitos fluviotorrenciales. Su formación está principalmente ligada a los agentes denudativos. (Ingeominas, 2009). En la zona de estudio se tiene presencia de este tipo de geoformas hacia el suroeste del barrio, sobre el terreno del barrio Bellavista (Figura 33). El escarpe denudacional se desarrolla sobre la UGS Sft3, con índices de relieve muy bajos, pendientes escarpadas, forma de la ladera abrupta y de la cresta plana disectada, y longitud de la ladera muy corta. El patrón de drenaje es subdendrítico con densidad moderada y frecuencia media. La cobertura de la geoforma corresponde a herbazales densos y algunos árboles hacia la base y en los drenajes de mayor tamaño que la disectan. La erosión varía desde laminar a cárcavas de intensidad suave. Por último, los movimientos en masa asociados son de tipo caídas de detritos y rocas y deslizamientos rotacionales, aunque se categorizan como poco activos por la densa cobertura vegetal.

Sobre dicha geoforma está situado un carreteable, por lo que se están realizando obras para estabilizar el talud (Figura 34).



Figura 34. EG D7. Unidad cubierta de vegetación, localizada al sur del barrio Bellavista.



Figura 35. Obras en ejecución para la estabilización de la vía localizada sobre el talud del EG D7.

- Laderas muy inclinadas (D10). Se constituyen por laderas de origen natural con pendientes aproximadas entre 40° y 70° , pueden estar parcialmente cubiertas por depósitos de ladera (Ingeominas, 2009). En la zona de estudio, se encuentran laderas muy inclinadas principalmente en la ladera norte del barrio (Figura 35), relacionadas al sistema de drenaje allí presente. Estos EG se desarrollan usualmente sobre la UGS Sft3 con índices de relieve muy bajo a bajo, longitudes de ladera muy cortas a cortas, formas de laderas irregulares con cimas convexas amplias y planas disectadas, además presentan una cobertura de bosque secundario, pastos naturales y rastrojos bajos principalmente. La red de drenaje es subdentrítica con densidad moderada y frecuencia media en general. Sobre estas geoformas se desarrolla erosión desde tipo laminar hasta cárcavas, de intensidad suave debido a la densa cobertura vegetal en la mayoría de las unidades. Por último,

sobre estas laderas se desarrollan caídas de detritos y tierra además de deslizamientos rotacionales, los cuales en su mayoría tienen un carácter activo.

En comparación con la cartografía anterior (Ingeominas,2009), el área de dichas geoformas ha disminuido debido al terraceo, corte, o llenado del terreno para fines urbanísticos.



Figura 36. EG D10. Unidad ubicada en la ladera norte del barrio.

- Laderas moderadas (D11). Unidades conformadas por laderas onduladas de origen natural con pendientes aproximadas entre 10° y 40°. (Ingeominas, 2009). Presentan amplia extensión tanto en la ladera norte como en la ladera sur del barrio. Hacia la ladera sur presentan cobertura vegetal baja a mediana (Figura36)., mientras en la ladera norte, en inmediaciones al drenaje norte del barrio la cobertura vegetal es más densa e incluye vegetación alta relacionada a la cobertura de bosque secundario. Estos EG se desarrollan sobre las UGS Sft3 y Sfe1, con índices de relieve de

muy bajo a bajo, longitudes de ladera de muy cortas a moderadas y formas de ladera irregulares con cimas convexas amplias. Desarrollan en general un patrón de drenaje dendrítico de baja densidad y frecuencia baja. La erosión es de carácter laminar y en surcos principalmente de intensidad suave a moderada. A estas laderas se asocian movimientos en masa de tipo caídos, deslizamientos rotacionales y traslacionales que varían en actividad de poco activos a activos.

Se evidencia en comparación con la cartografía anterior (Ingeominas, 2009), que una considerable extensión de estas geoformas ha sido explanada y terraceada para fines de urbanización principalmente.



Figura 37. EG D11. Unidad ubicada sobre la ladera sur del barrio. Escasa intervención antrópica.

- Depósitos coluviales (D13). Son unidades modeladas por la acumulación de materiales (suelo residual y/o fragmentos de roca), transportados por la acción de la gravedad de zonas puntuales ligeramente más elevadas. (Ingeominas, 2009).

Para la zona de estudio se tiene presencia de esta unidad al suroeste del barrio, sobre la ladera adyacente al mismo (Figura 37) y en una franja de la ladera sur del barrio San Antonio de Carrizal. Dicha geoforma presenta una cobertura vegetal densa lo cual dificulta su estudio, no obstante, esto es indicio de la inactividad o poca actividad morfodinámica de la misma. Este EG se ubica en la unidad Sco1, morfométricamente presenta índices de relieve muy bajos con pendientes moderadas a escarpadas y laderas de longitud muy corta con formas irregulares a convexas y crestas agudas y convexas amplias. La red de drenaje es de tipo subdendrítico de densidad baja a moderada con frecuencia baja a media. El tipo de erosión desarrollado es laminar y en surcos principalmente con intensidad suave. Los movimientos en masa asociados son de tipo caídas de rocas y detritos, volcamientos y deslizamientos rotacionales de carácter poco activo.



Figura 38. EG D13. Unidad ubicada sobre la ladera sur del barrio, se evidencia la alta cobertura vegetal y la depresión topográfica asociada.

- Tierras malas (D19). Unidades conformadas por terrenos afectados por erosión hídrica severa, desarrollando múltiples surcos y cárcavas profundas, hondonadas estrechamente espaciadas y en algunos casos estoraques, con escasa cobertura vegetal. (Ingeominas, 2007). En la zona de estudio, se ubican hacia la cima de la ladera sur del barrio (Figura 38), sobre materiales muy friables, principalmente sobre niveles arcillosos de la UGS Sft4, sobre los cuales no se encuentra cobertura vegetal, correspondiendo a la categoría de cobertura suelo desnudo. Morfométricamente presenta pendientes moderadas, índice de relieve bajo, ladera de longitud muy corta con forma irregular y cima plana. La red de drenajes asociada es de tipo subdendrítico con densidad moderada y frecuencia media. El tipo de erosión varía entre surcos y cárcavas de intensidad severa. Por otro lado, los movimientos en masa asociados son de tipo caídas y volcamientos asociados a erosión diferencial, de carácter poco activo.



Figura 39. EG D19. Unidad ubicada sobre la parte más alta de la ladera sur del barrio. Presenta un alto grado de erosión formando surcos y cárcavas, además de ausencia de cobertura vegetal.

- Laderas terrazadas (A2). Unidades conformadas por superficies naturales del terreno con inclinaciones entre 10° y 65° que han sido intervenidas por la acción antrópica mediante cortes sucesivos en forma de terrazas. (Ingeominas, 2007). La mayor área del barrio se encuentra sobre esta unidad geomorfológica (Figura 39), por lo que su origen se asocia principalmente a la urbanización de la zona, además esta geoforma ha ganado extensión a medida que el proceso de urbanización avanza. Este EG se ubica sobre las UGS Sft3, Sfe1 y Sla, con índices de relieve de muy bajo a bajo y laderas de longitud corta a moderada de formas planas y formas de las crestas agudas a convexas amplias. La cobertura de suelo corresponde principalmente a la categoría de construcciones urbanas. La red de drenaje es de tipo subdendrítico y paralelo relacionado a la

infraestructura de canalización, de baja densidad y frecuencia muy baja. La erosión se desarrolla de forma laminar y en surcos con intensidad suave a moderada. Los movimientos en masa relacionados corresponden a caídas de detritos en las laderas de las terrazas principalmente, no obstante, son de carácter poco activo debido a la intervención antrópica.



Figura 40. EG A2. La mayoría del barrio se encuentra sobre esta unidad. Se evidencian los distintos niveles de terrazas acondicionados para la construcción de las viviendas.

- Llenos de escombros (A3). Unidades conformadas por botaderos de desechos o estériles provenientes de la explotación minera y de la construcción. (Ingeominas, 2007). Para el área de estudio esta geoforma guarda íntima relación con la UGS Sla, se tiene presencia de esta unidad al occidente del barrio, donde constituye el llenado parcial de un antiguo drenaje para aprovechar el terreno y dar continuidad al barrio (ver Figura 22). Morfométricamente presenta pendientes moderadas, índices de relieve muy bajos y laderas de longitudes cortas con formas irregulares y crestas convexas amplias. La cobertura corresponde a la categoría de construcciones urbanas. La red de drenaje posee un patrón dendrítico a subdendrítico con densidad baja y frecuencia baja a muy baja. La erosión se desarrolla con intensidad suave de tipo laminar principalmente.

A partir del análisis de las imágenes satelitales multitemporales (Figura 22) se puede deducir que la mayor actividad relaciona con el inicio del lleno tuvo lugar entre el 2002 y el 2005, además, esta actividad ha sido continua desde su inicio, pues el drenaje se ha venido adecuando para el asentamiento urbano. Mediante la elaboración de cortes de datos topográficos anteriores al llenado del depósito de aproximadamente el 2004 y posteriores del 2017, se observa con mayor claridad la evolución de esta geoforma (Figuras 40 y 41). Es probable que el desfase de alturas entre los dos cortes esté relacionado a diferentes procedimientos utilizados en el levantamiento de las dos topografías, pues estas difieren en escala y en el tiempo de levantamiento, eso se debe asumir a razón de la falta de control de los datos de entrada. Sin embargo, es clara la diferencia entre la forma del terreno en los tres cortes elaborados, donde se tiene para el 2004 un drenaje con un valle bien definido, mientras en el 2017 este valle ha sido notablemente suavizado, hasta el punto de invertir su relieve como se aprecia en el corte R2. En cuanto a la morfodinámica, a este elemento geomorfológico se relacionan movimientos en masa de tipo complejos de carácter inactivo a poco activo.



Figura 41. Ubicación de los cortes topográficos sobre los rellenos antrópicos.

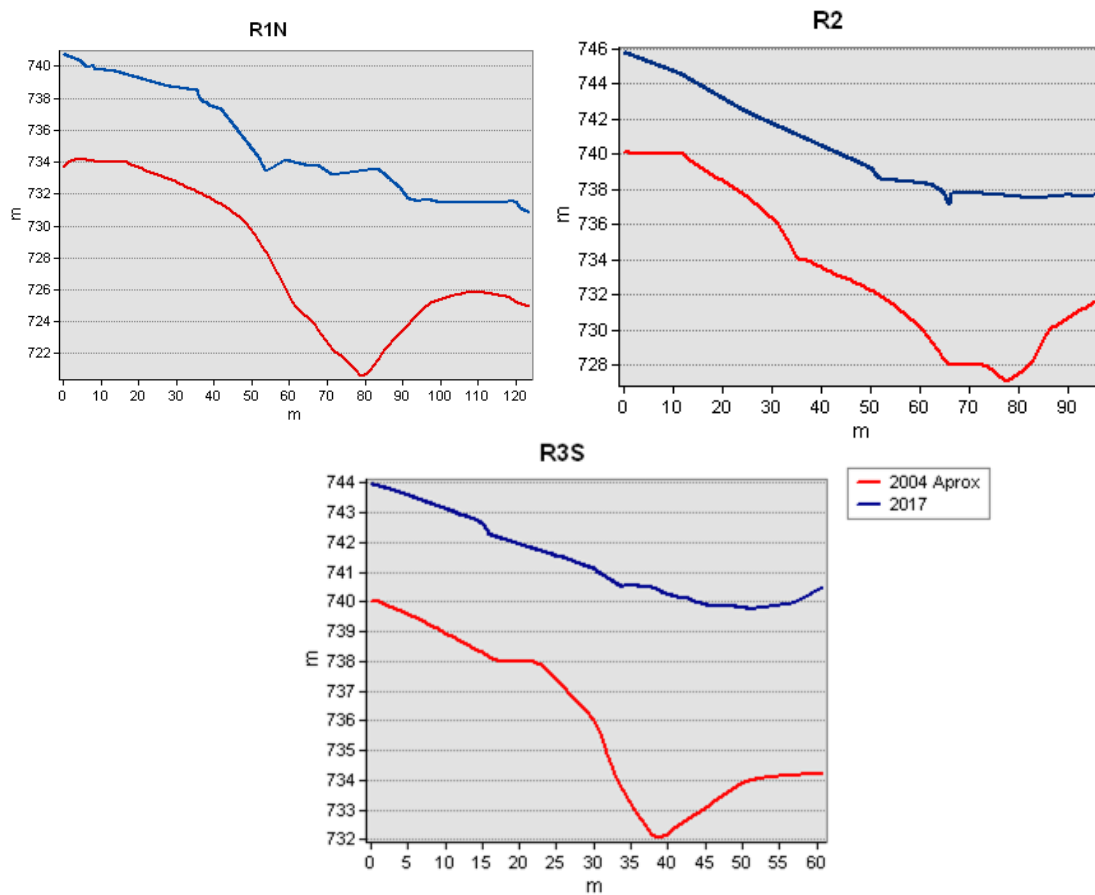


Figura 42. Cortes topográficos multitemporales sobre el relleno antrópico.

- Laderas explanadas (A9). Unidades conformadas por cortes de laderas con el fin de disminuir la pendiente, adecuando el terreno para la construcción de vivienda u obras de infraestructura. (Ingeominas, 2007). Estas geoformas están ubicadas al noreste y suroccidente del barrio, las cuales se adecuaron para la construcción de canchas deportivas (Figura 42) y vivienda principalmente. Estas EG ubican en la UGS Sft3, con inclinaciones de ladera plana a suave, índices de relieve muy bajos y laderas con longitudes muy cortas a cortas, de formas planas y cimas agudas. La cobertura del suelo corresponde a construcciones urbanas y a pastos y rastrojos bajos, mientras que la red de drenaje es de tipo dendrítica con densidad baja y frecuencia muy baja. En cuanto a la morfodinámica se tiene erosión de tipo laminar de intensidad suave generalmente, y no se asocian movimientos en masa a este tipo de geoformas.



Figura 43. EG A9. La cancha principal del barrio corresponde a un ejemplo de esta unidad, ubicada sobre una antigua ladera al norte del barrio.

- Corte vertical de laderas (A10). Unidades constituidas por taludes que han sido cortados en forma vertical con fines ingenieriles (Ingeominas, 2007). Estas unidades se asocian principalmente a obras necesarias para la construcción de vías de comunicación, localizadas sobre las vías principales (Figura 43) al oriente del barrio y en la ladera sur del mismo.

Estas geoformas se encuentran en las UGS Sft3 y Sfe1, con pendientes abruptas a escarpadas e índices de relieve muy bajos. Las laderas tienen longitudes muy cortas, formas planas y cimas agudas, además la cobertura de suelo varía de herbazales a suelos desnudos. La red de drenaje es de tipo subdendrítico a dendrítico con densidad alta y baja y frecuencias variables dependiendo de la cobertura del suelo. En cuanto a la morfodinámica se desarrolla erosión desde tipo laminar hasta en cárcavas variando en intensidad en función de la cobertura de suelo. Los movimientos en masa asociados son principalmente las caídas de roca y detritos los cuales presentan un carácter activo.

Cabe resaltar que a pesar de las elevadas pendientes que presentan los cortes verticales de ladera, no se tienen obras ingenieriles para la mitigación del riesgo que estas representan, a excepción del corte ubicado adyacente al puente peatonal en la entrada del barrio, donde existe una cubierta de malla de metal cuya función se relaciona al control de movimientos por caída de rocas y detritos, no obstante, esta malla se encuentra deteriorada en algunas zonas.



Figura 44. EG A10. Unidad ubicada adyacente al paso de vías y producto de la construcción de estas, como la carretera Girón – Lebrija. Nótese que no se tienen obras para estabilizar los movimientos en masa aun cuando hay casetas comerciales y tránsito de peatones adyacente al talud.

Luego de la identificación de los EG, estos fueron cartografiados (figura 44), donde se observa la distribución espacial en el área (figura 45) con un dominio espacial de laderas terrazadas correspondientes a las áreas con construcciones urbanas. Además, se pueden observar los dos taludes predominantes al sur y al norte del barrio conformados por laderas inclinadas y moderadas en su mayoría. También, se destaca el talud de cortes verticales de ladera sobre la autopista principal, al oriente del barrio.

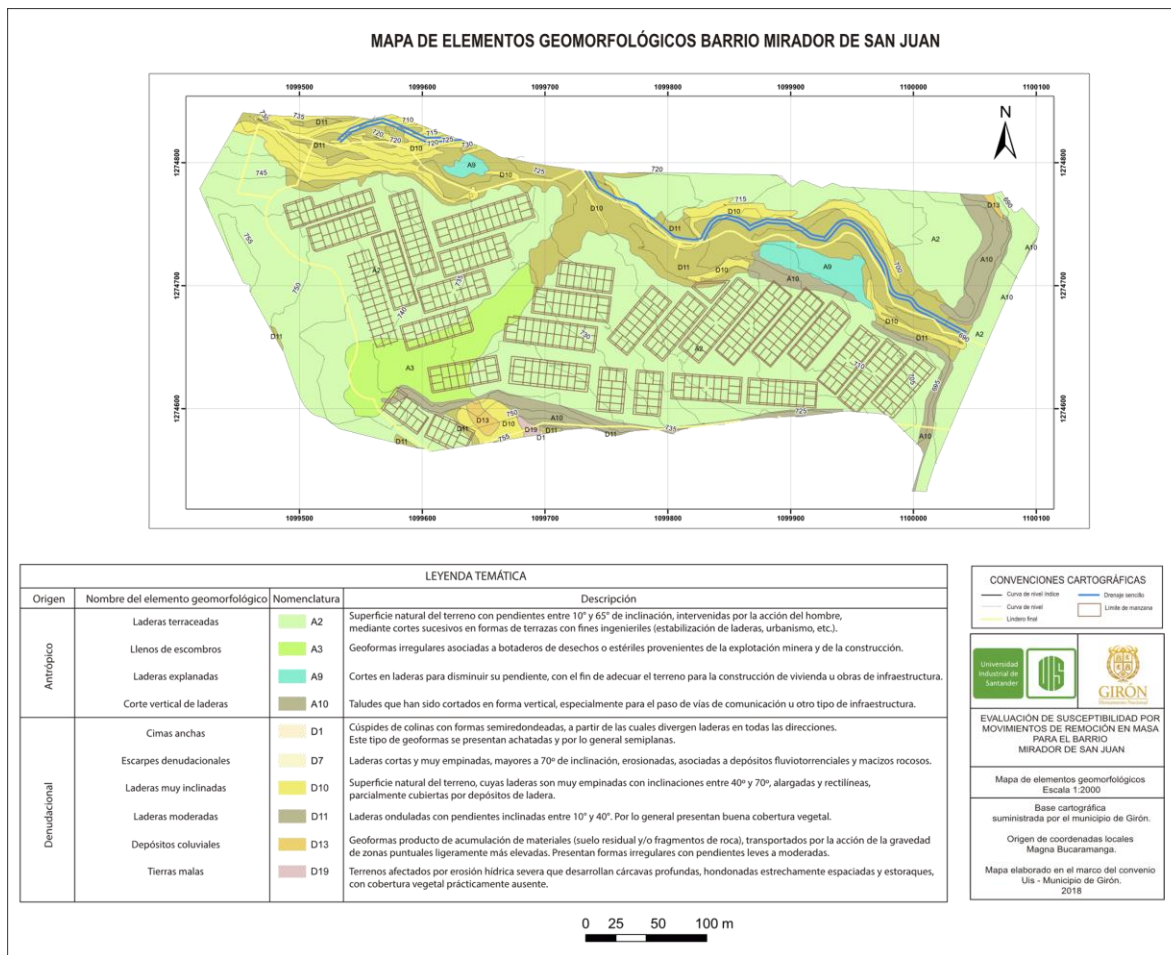


Figura 45. Mapa de unidades geomorfológicas.

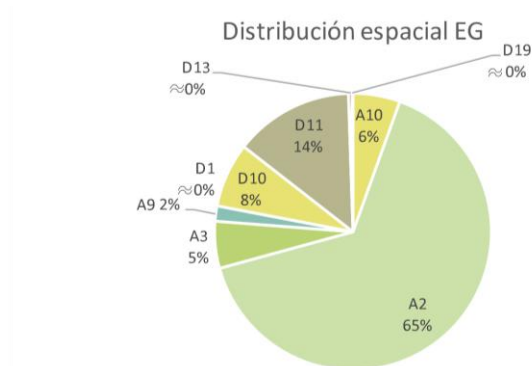


Figura 46. Distribución espacial de elementos geomorfológicos.

6.1.1.6 Morfometría. Luego de unir las curvas topográficas del barrio proporcionadas por la secretaría de infraestructura del municipio con las curvas topográficas del talud sur levantadas para dar cumplimiento a los objetivos de la práctica, se realizó el modelo digital de elevaciones (DEM) y a partir de este, se generó el mapa de pendientes (figura 46) de la zona de estudio con los intervalos utilizados por el municipio.

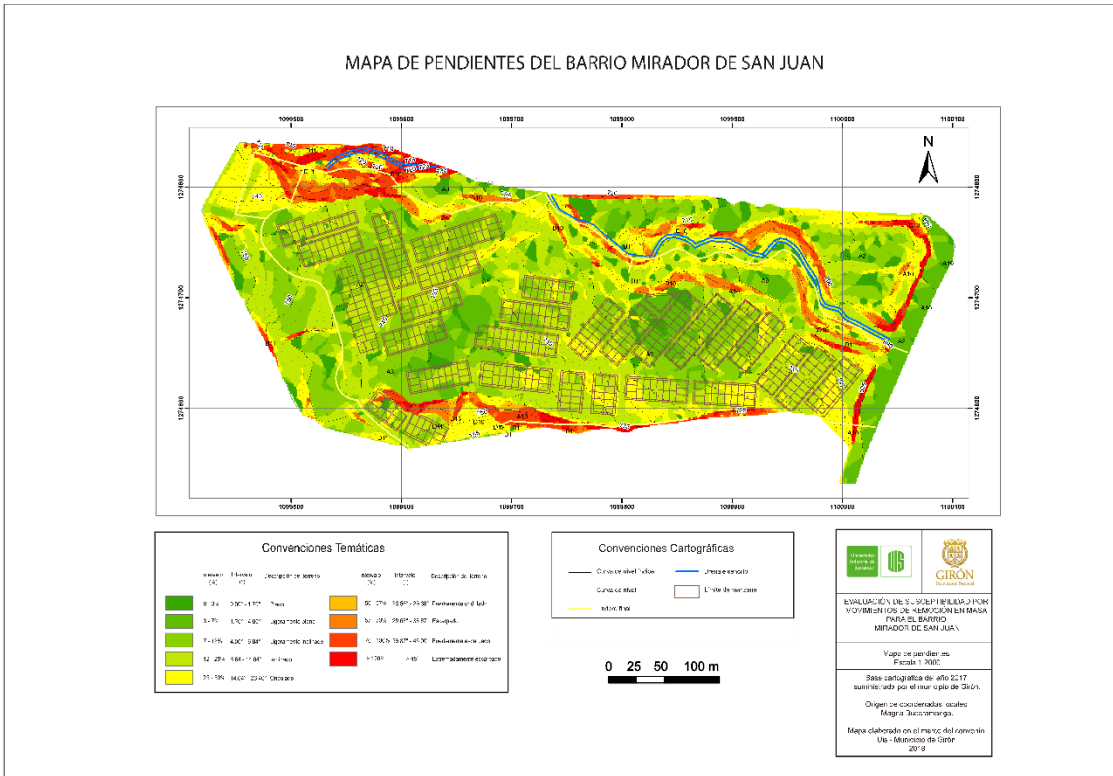


Figura 47. Mapa de pendientes.

A partir del mapa se generó una gráfica de distribución espacial de las pendientes, donde se evidencia que los terrenos con topografía de escarpada (50 – 70%) a extremadamente escarpada (> 100%) conforman aproximadamente el 10% del área de estudio, correspondiendo principalmente a los taludes sur y norte del barrio, y al talud de la carretera principal al oriente de este.

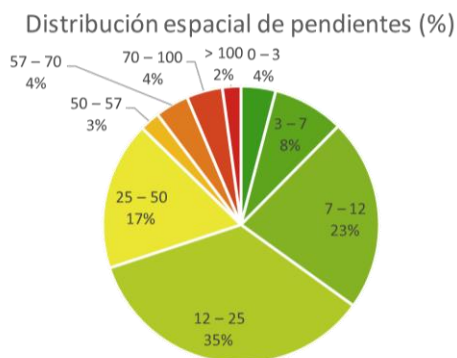


Figura 48. Distribución espacial de pendientes.

6.1.1.6 Morfodinámica. Se identificaron principalmente tres tipos de movimientos en masa que en orden de ocurrencia son: caída de detritos y tierra, movimientos traslacionales y movimientos rotacionales. Localmente se asocian otros tipos de movimientos como volcamientos y deslizamientos compuestos.

Las caídas de detritos se asocian principalmente al suelo gravoso de la Formación Órganos (Sft3) y al suelo de flujo de escombros antiguos (Sfe1), lo cual es promovido por los altos grados de erosión de algunas zonas y la baja cobertura vegetal (figura 48).



Figura 49. Caída de detritos en la entrada al barrio Mirador de San Juan.

Los movimientos traslacionales corresponden a movimiento de material de las capas más superficiales de manera relativamente paralela a la superficie topográfica. Es común este tipo de movimientos en la ladera norte del barrio (figura 49), pues hay presencia de un lleno antrópico en la cima de la ladera. Este suelo de llenos antrópicos es muy susceptible a los deslizamientos debido a su baja compactación, además el contacto con los suelos de la Formación Bucaramanga constituye un plano de debilidad.

Los movimientos rotacionales, se asocian a materiales finos con meteorización de media a alta, lo cual es ampliamente promovido por la saturación de agua en el suelo. Estos materiales finos se

encuentran en la parte inferior del segmento gravoso del miembro Órganos y en la UGS Sft3 principalmente.

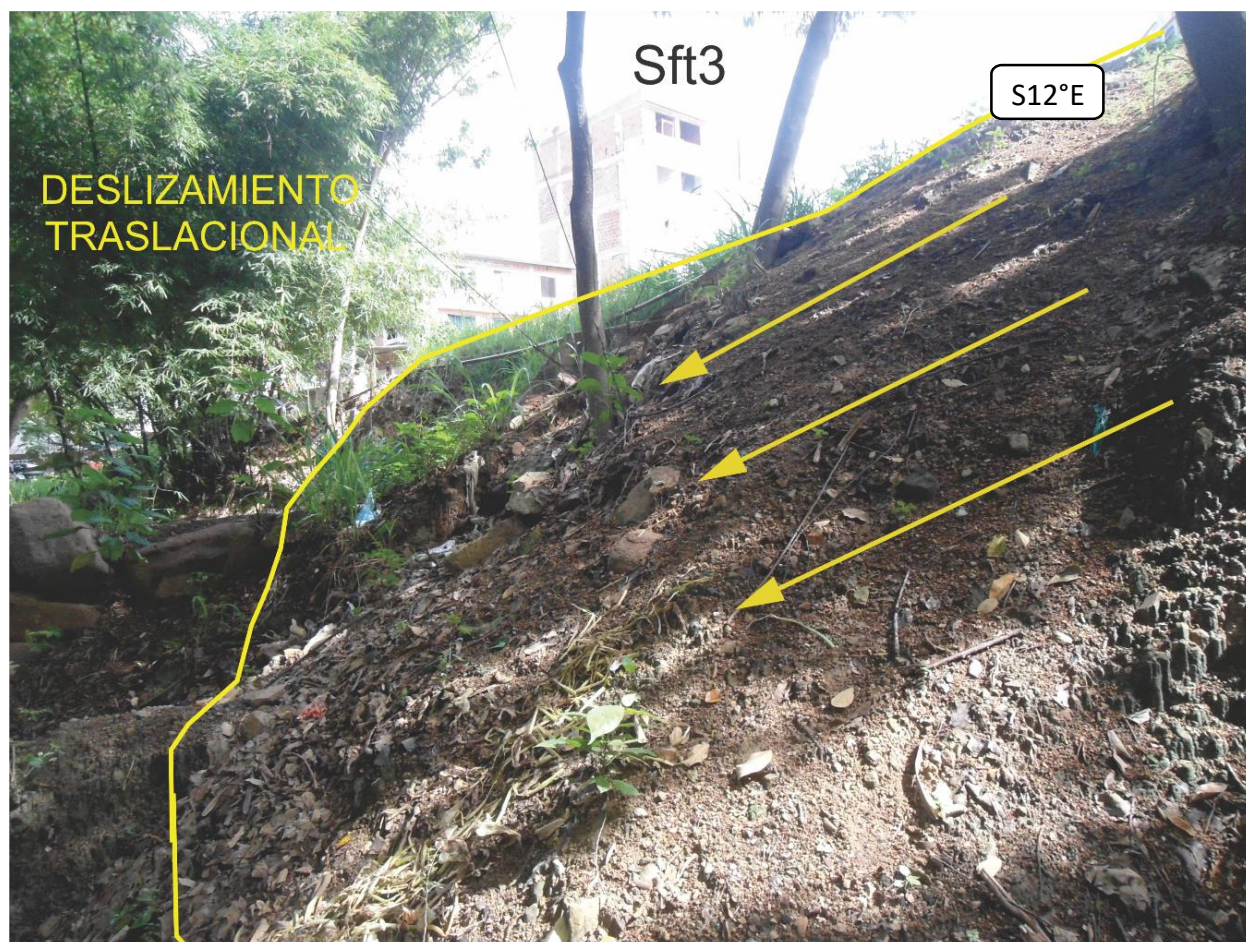


Figura 50. Deslizamiento traslacional en la ladera norte del barrio Mirador de San Juan.

Los movimientos en masa reconocidos en el área fueron consignados en un inventario (Tabla 10), donde se indican las ubicaciones y la clasificación de los fenómenos de remoción en masa identificados. Además, estos fenómenos de remoción en masa fueron representados en el mapa morfodinámico de fenómenos de remoción en masa (figura 50), el cual es de gran relevancia para calibrar los modelos heurísticos de susceptibilidad y amenaza.

Tabla 10.
Distribución espacial de elementos geomorfológicos.

UBICACIÓN		NOMENCLATURA	TIPO DE MOVIMIENTO
X	Y		
1100017	1274593	Cd	Caida de detritos
1100023	1274606	Cd	Caida de detritos
1100006	1274649	Cdt	Caida de detritos y tierra
1099994	1274655	Cdt	Caida de detritos y tierra
1099993	1274665	Cd	Caida de detritos
1099836	1274702	Cdt/Dt	Caida de detritos y tierra/ Deslizamiento traslacional
1099777	1274728	Cdt	Caida de detritos y tierra
1099576	1274796	Dt	Deslizamiento traslacional
1099566	1274796	Dt	Deslizamiento traslacional
1099459	1274828	Cdt/Dr	Caida de detritos y tierra/ Deslizamiento traslacional
1099450	1274829	Cdt/Dr	Caida de detritos y tierra/ Deslizamiento traslacional
1099506	1274657	Cd	Caida de detritos y tierra
1099604	1274602	Cdt	Caida de detritos y tierra
1099643	1274603	Cdt	Caida de detritos y tierra
1099690	1274587	Cd	Caida de detritos
1099764	1274576	Cdt/Dc	Caida de detritos y tierra / Deslizamiento compuesto
1099801	1274575	Cdt/V	Caida de detritos y tierra/ Volcamiento
1099882	1274544	Cdt	Caida de detritos y tierra
1099877	1274521	Cdt	Caida de detritos y tierra
1099933	1274588	Cdt/Dr	Caida de detritos y tierra/ Deslizamiento rotacional
1100050	1274678	Cdt	Caida de detritos y tierra
1100074	1274735	Cdt	Caida de detritos y tierra
1099940	1274852	Cd	Caida de detritos
1099652	1274810	Cd	Caida de detritos



Figura 51. Mapa morfodinámico de procesos de remoción en masa.

El inventario y el mapa de morfodinámica son un reflejo de la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa para la situación actual de la zona, condiciones que deben ser consideradas para posteriores fases en el estudio de riesgo geológico.

6.1.1.8 Usos del suelo. A continuación, se presentan las diferentes unidades presentes en la zona de estudio, producto de la reinterpretación y actualización de la información de cobertura del suelo. Es importante resaltar que los cambios causados han sido causados en su mayoría por acción antrópica. Se tienen dos jerarquías de clasificación: clase y nombre.

En el marco de clasificación de Ingeominas (2007), se identificaron ocho unidades en la zona de estudio: Construcciones Urbanas, Bosque secundario, Rastrojo bajo, Pastos y árboles, Suelo desnudo, Construcciones Rurales/ arboles, Pastos naturales/Rastrojos Bajos y por último Rastrojos bajos/ Suelos desnudos (Tabla 11).

Tabla 11.

Clasificación de unidades de uso del suelo con metodología de Ingeominas (2007).

Unidades de uso de suelo con metodología de Ingeominas			
Clase	Nombre	Nomenclatura	Descripción
Construcción	Construcciones Urbanas	Cu	Obras realizadas por el hombre para su servicio y beneficio, ubicadas dentro del perímetro urbano definido por cada municipio
Bosques y/o montes	Bosque secundario	Bs	Bosque con alto nivel de intervención. Corresponde a una vegetación arbórea y arbustiva que ha perdido su estructura, o algunas especies vegetales originales apareciendo en su lugar sucesiones secundarias.
	Rastrojo bajo	Rb	Cobertura donde aparecen especies herbáceas y arbustivas con alturas aproximadas entre 1 y 3 metros. No aparece el estrato arbóreo.
Eriales	Suelo desnudo	Sd	Áreas (sin cobertura vegetal) sobre las cuales han ocurrido fenómenos de erosión por causas naturales o antrópicas o que el hombre ha intervenido en forma de terraplenes, canteras, manejo de materiales para industria o construcciones.
Asociaciones	Construcciones Rurales/ arboles	Cr + Ar	Área cuya cobertura mayor está dada por construcciones rurales, el resto de la superficie es ocupada por árboles, sin embargo, cada una de las clases ocupa menos del 70%.
	Pastos naturales/Rastrojos Bajos	Pn + Rb	Área cubierta por pasto natural, y rastrojo bajo, siendo el pasto el de mayor cobertura sin alcanzar el 70% del área.

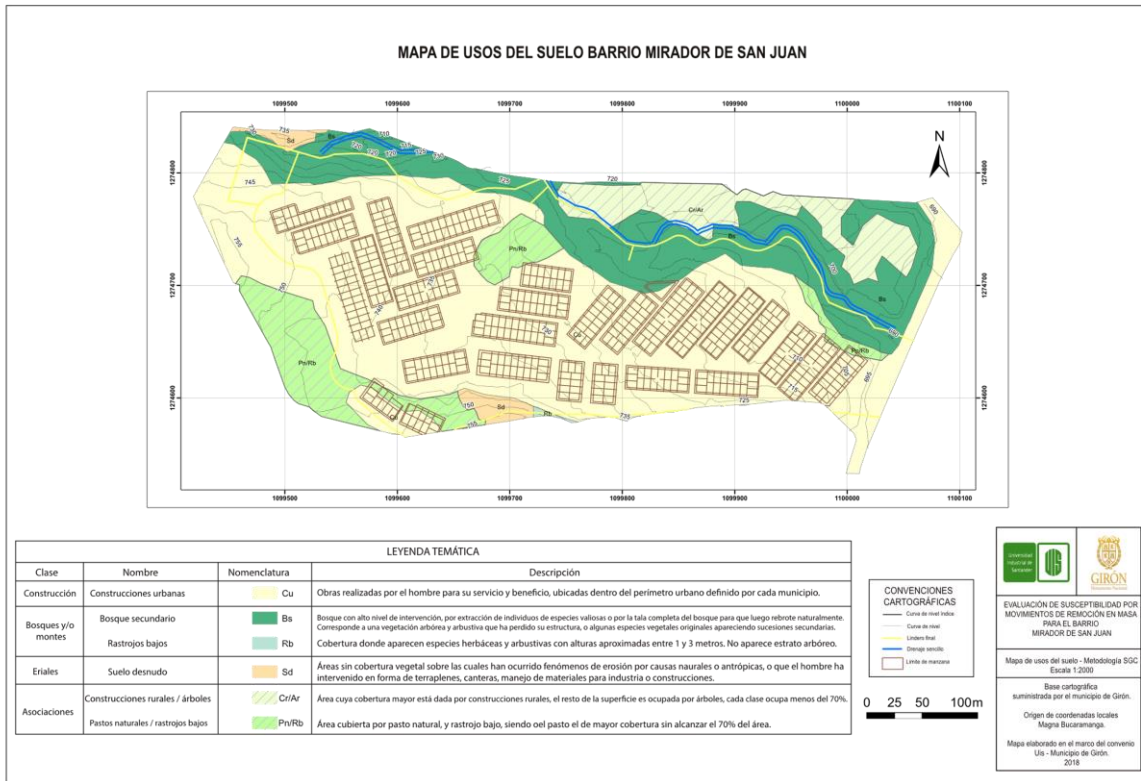


Figura 52. Mapa de usos del suelo con metodología de Ingeominas (2007).

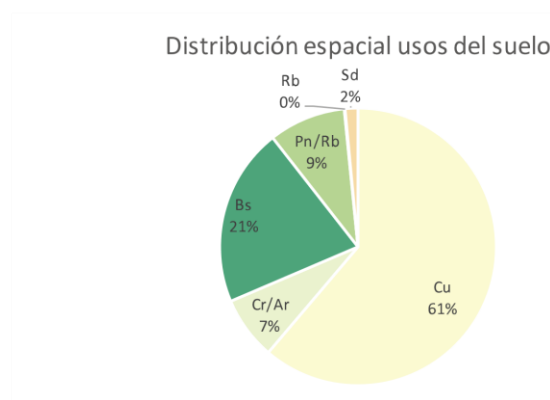


Figura 53. Distribución espacial de usos del suelo con metodología de Ingeominas (2007).

Posteriormente, de acuerdo al sistema Corine Land Cover, se identificaron 5 unidades de uso de suelo en la zona de estudio: tejido urbano continuo, tejido urbano discontinuo, bosque fragmentado con vegetación secundaria, vegetación secundaria baja y tierras desnudas y degradadas (Tabla 12).

Tabla 12.

Clasificación de unidades de uso del suelo con metodología CLC.

Unidades de uso del suelo con metodología CLC			
Código CLC	Nombre	Nomenclatura	Descripción
1.1.1	Tejido urbano continuo	Tuc	Espacios conformados por edificaciones y espacio adyacentes a la infraestructura edificada. Las edificaciones, vías y superficies cubiertas artificialmente cubren más del 80% de la superficie del terreno.
1.1.2	Tejido urbano discontinuo	Tud	Espacios conformados por edificaciones y zonas verdes. Las edificaciones, vías e infraestructura cubren la superficie del terreno de manera dispersa y discontinua, ya que el resto del área está cubierta por vegetación.
3.1.3.2	Bosque fragmentado con vegetación secundaria	Bfvs	Territorios cubiertos por bosques naturales donde se presentó intervención humana y recuperación del bosque.
3.2.3.2	Vegetación secundaria baja	Vsb	Áreas cubiertas por vegetación principalmente arbustiva y herbácea con dosel irregular y presencia ocasional de árboles y enredaderas.
3.3.3	Tierras desnudas y degradadas	Td	Superficies de terreno desprovistas de vegetación o con escasa cobertura vegetal, debido a la ocurrencia de procesos tanto naturales como antrópicos de erosión y degradación extrema y/o condiciones climáticas extremas.

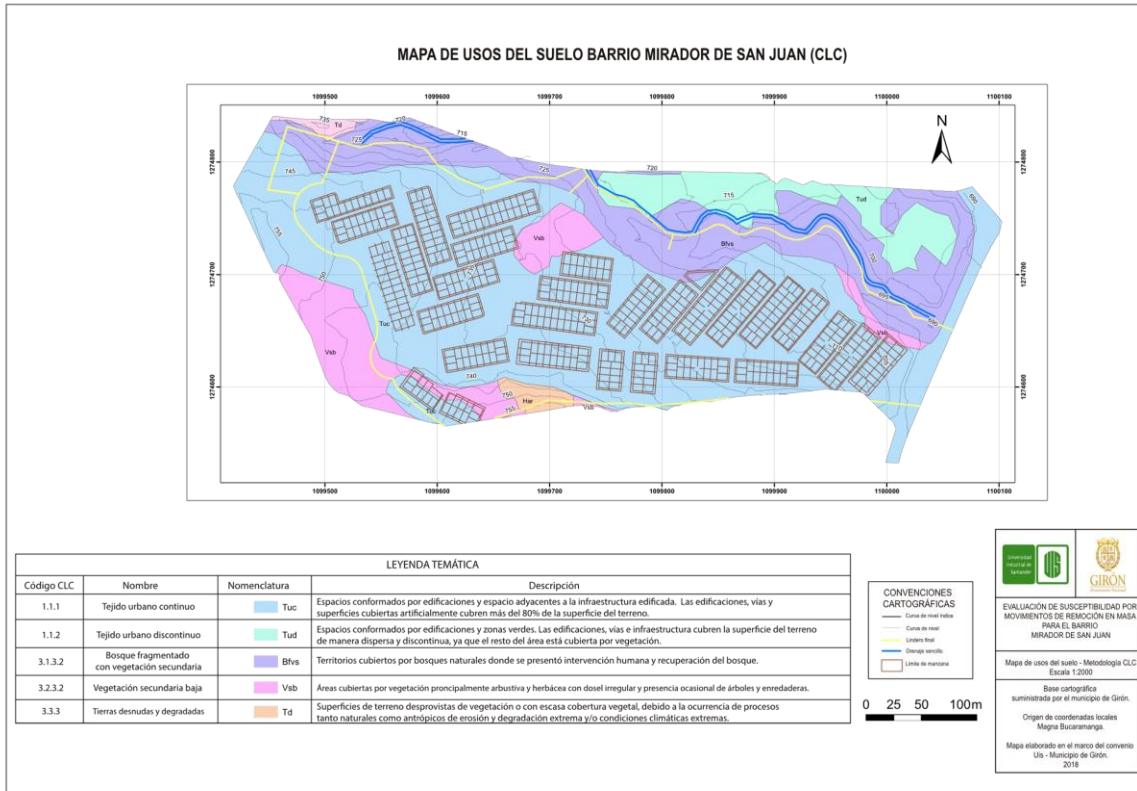


Figura 54. Mapa de usos del suelo con metodología CLC.

6.1.2 Condiciones geotécnicas. A partir de los estudios de las condiciones geológicas, se determinó que los taludes al norte, sur y oriente del área de estudio están relacionados a la mayor cantidad de movimientos en masa identificados. De estos taludes, el talud sur tiene la mejor exposición de la secuencia estratigráfica, por esta razón se decidió coleccionar muestras para estudios geotécnicos de este talud. Así, se coleccionaron 6 muestras para realizar pruebas para clasificación y ensayos de corte directo, 3 muestras realizadas en los laboratorios de ConstruSuelos y 3 en los laboratorios de la Universidad Industrial de Santander por los autores de este trabajo, donde además se realizaron ensayos de humedad y compactación. Para el resto del área de estudio se cuenta con información de sondeos manuales y mecánicos realizados en el barrio previamente por la secretaría de infraestructura (Anexo C). Para el sondeo 5, adyacente al talud B, se calcularon los

parámetros de fricción por medio de las ecuaciones propuestas por Álvarez & Sandoval (2012) para los diferentes materiales de la Formación Bucaramanga, puesto que este sondeo se encuentra sobre la zona donde se generó el modelo determinístico de estabilidad para el talud. Es importante mencionar que estas ecuaciones consideran como valor de entrada un valor N corregido por confinamiento principalmente, no obstante, como se quiere saber el valor en su estado natural no se realizó la corrección. Por último, dada la gran densidad de datos de SPT en el sondeo, estos se promediaron mediante promedio aritmético para cada material homogéneo distinguido en el sondeo. Los parámetros de peso unitario y cohesión fueron estimados por el geólogo tutor de la práctica a partir de los rangos manejados para los materiales en cuestión, con el objetivo de generar la base de datos necesaria para el modelado. Las aproximaciones mencionadas con anterioridad deben ser tenidas en cuenta al momento de hacer uso de los resultados de los modelos.

Tabla 13.

Ecuaciones utilizadas para calcular la fricción a partir del ensayo SPT. Adaptado de Álvarez & Sandoval (2012).

ECUACIONES UTILIZADAS PARA CALCULAR LA FRICCIÓN A PARTIR DEL ENSAYO SPT	
Clasificación del suelo (SUCS)	Ecuación
CL	$(2,12 * \ln(N)) + 17,66$
SC	$(4,27 * \ln(N)) + 9,07$
SM	$(0,29 * \ln(N)) + 28,22$

6.1.3 Modelo geológico – geotécnico. Consiste en el compilado y relación de la información del modelo geológico con las características del modelo geotécnico, obteniendo con mayor certeza una primera aproximación a la susceptibilidad a movimientos en masa del área de estudio. Se identificó, que las pendientes son el factor más importante asociado a la ocurrencia de movimientos en masa. Por otro lado, la variación en el material sedimentario se refleja en el tipo de movimiento dominante, por ejemplo, en las capas de sedimentos gruesos de los suelos gravosos del miembro órganos, se favorece la ocurrencia de caída de detritos, mientras que en las capas finas de la misma unidad predominan los movimientos rotacionales asociados a saturación del subsuelo. No obstante, en general los niveles finos de esta unidad tienen altos contenidos de arcilla lo cual genera cohesión en los suelos y consecuente resistencia al esfuerzo cortante, como se puede observar en los resultados de los estudios geotécnicos.

Otro factor por considerar, ilustrado en el corte geológico y en la figura 54, es que las capas de sedimentos tienen buzamientos entre 11° y 16° aproximadamente hacia el suroeste, y dado que los principales taludes del barrio tienen una dirección aproximada este-oeste, la orientación de las capas favorece a la estabilidad de los taludes.

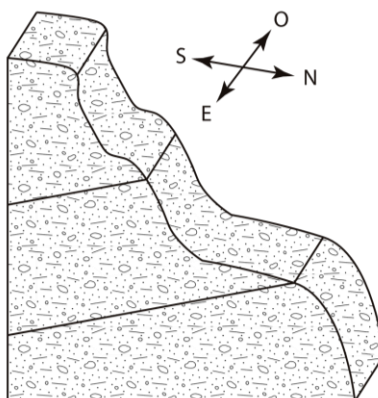


Figura 55. Orientación de las capas del suelo gravoso del miembro Órganos en relación con los taludes sur y norte de la zona de estudio.

Por otro lado, las facies identificadas además de permitir la ubicación en el ambiente deposicional también permiten la identificación del material susceptible a desprendimiento y por ende con un mayor valor de amenaza al momento de ser usados en el modelado del perfil geotécnico de la zona de estudio. En la descripción de las litologías de las columnas estratigráficas se puede relacionar directamente que presenta una menor compactación (competencia friable y media) las litologías pertenecientes a la Facies 2 (Facies Areniscas Gruesas a finas), por ende, al momento del modelado geotécnico las litologías pertenecientes a esta facie presentaran una mayor susceptibilidad.

6.2 Identificación preliminar de la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa.

Mediante el uso del método heurístico se logró una zonificación preliminar de la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa en el área de estudio. Las variables y ponderaciones utilizadas en la elaboración del modelo se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 14.

Ponderación de variables para zonificación de susceptibilidad.

PONDERACIÓN DE VARIABLES PARA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD	
Variable	Ponderación
Unidades geológicas superficiales	20%
Elementos geomorfológicos	25%
Morfometría	40%
Usos del suelo	15%

Tabla 15.

Ponderación de unidades geológicas superficiales.

PONDERACIÓN DE UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES	
UGS	Ponderación
Suelo arenoso del miembro Órganos	1
Llenos antrópicos	2
Suelo arcilloso del miembro Órganos	3
Suelos coluviales antiguos	3
Suelo gravoso del miembro Órganos	4
Suelos coluviales recientes	4
Suelo de flujos de escombros antiguos	5

Tabla 16.

Ponderación de elementos geomorfológicos.

PONDERACIÓN DE ELEMENTOS GEOMORFOLÓGICOS	
EG	Ponderación
Laderas explanadas	1
Cimas anchas	1
Laderas terrazadas	2
Llenos de escombros	3
Laderas moderadas	4
Depósitos coluviales	4
Tierras malas	4
Corte vertical de laderas	4,5
Laderas muy inclinadas	5

Tabla 17.

Ponderación de morfometría.

PONDERACIÓN DE MORFOMETRÍA	
Intervalo de pendientes (%)	Ponderación
0 – 3	1
3 – 7	1,5
7 – 12	2
12 – 25	2,5
25 – 50	3
50 – 57	3,5
57 – 70	4
70 – 100	4,5
> 100	5

Tabla 18.

Ponderación de usos del suelo.

PONDERACIÓN DE USOS DEL SUELO	
Uso del suelo	Ponderación
Construcciones urbanas	1
Rastrojos bajos	3
Construcciones rurales / árboles	4
Suelo desnudo	4
Bosque secundario	5
Pastos naturales / rastrojos bajos	4

En base a la suma ponderada de los mapas de cada variable en el software SIG, se obtuvo el mapa de susceptibilidad de la zona de estudio (figura 55). Además, en la figura 56, se puede observar la distribución espacial de cada nivel de susceptibilidad en el área de estudio, donde en su mayoría las principales casas del barrio se encuentran en zonas con baja susceptibilidad, a

excepción de aquellas que colindan con los taludes, los cuales presentan susceptibilidad media a alta.

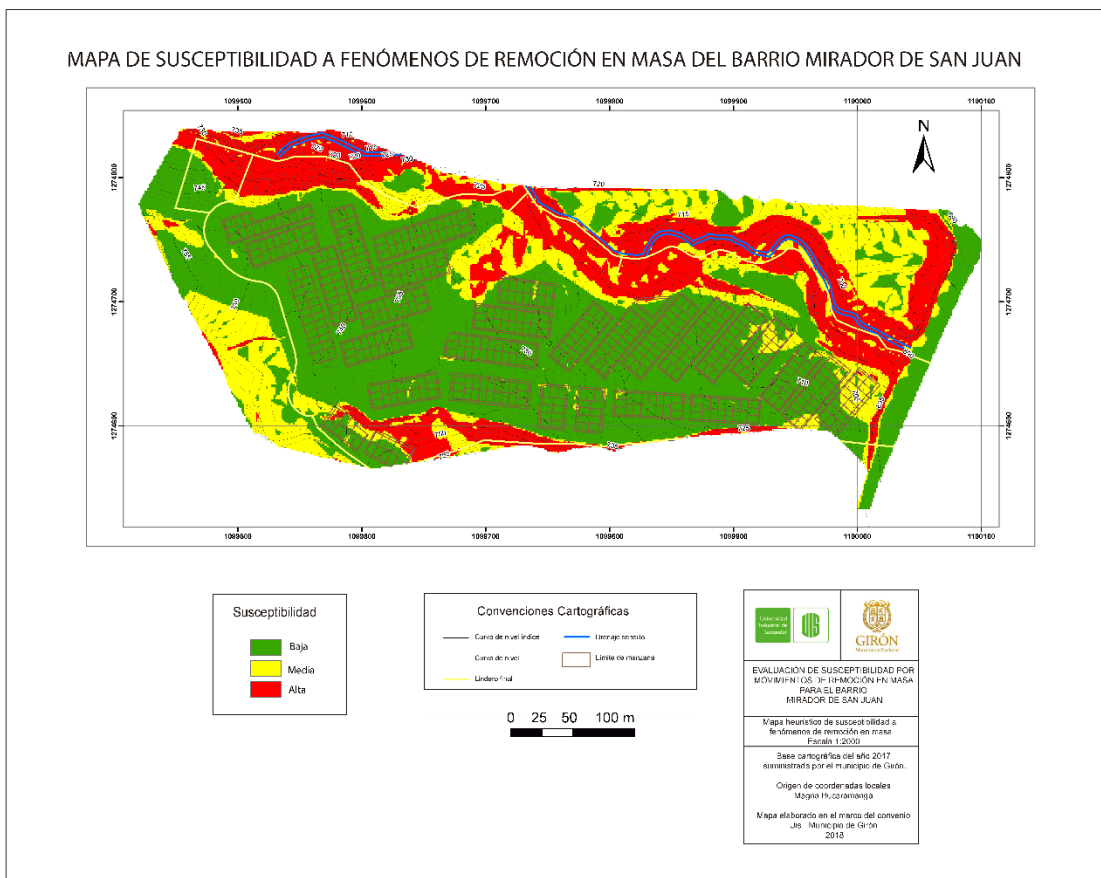


Figura 56. Mapa de susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa.

Distribución espacial de susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa

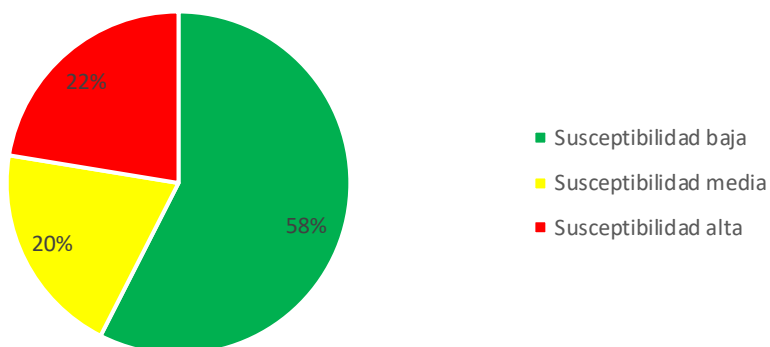


Figura 57. Distribución espacial de la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa.

6.3 Identificación y evaluación preliminar de la amenaza por fenómenos de remoción en masa.

Se realizó una evaluación de la amenaza por fenómenos de remoción en masa por dos métodos: el método heurístico y el método determinístico. A partir del primer método se obtuvo una zonificación cualitativa de la amenaza para los diferentes escenarios de factores detonantes considerados, insumo que dio lugar a la identificación de las zonas más críticas, de las cuales, en función de la información disponible se eligieron 5 zonas para realizar análisis de amenaza a remoción en masa por métodos determinísticos. De este último análisis, se obtiene una clasificación cuantitativa del grado de amenaza para las zonas evaluadas y bajo los diferentes escenarios, esto en función del factor de seguridad.

6.3.1 Evaluación preliminar de amenaza por el método heurístico. El método heurístico se utilizó para generar la primera aproximación a la zonificación de amenaza de la zona. Esta

evaluación se llevó a cabo mediante la suma ponderada de tres variables: susceptibilidad, lluvias y sismos, con diferentes configuraciones para cada escenario de amenaza (Tabla 19).

Tabla 19.

Escenarios para el análisis de estabilidad de taludes.

ESCENARIOS PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES		
ESCENARIOS	CONDICIÓN DE SATURACIÓN	SISMICIDAD
1. Condición actual	Sin	Sin
2. Parcialmente saturado	Parcialmente saturado	Sin
3. Condición con sismicidad	Sin	Con
4. Parcialmente saturado y con sismicidad	Parcialmente Saturado	Con

De esta manera, las ponderaciones de las variables usadas para cada escenario se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20.

Ponderaciones usadas para la zonificación de amenaza por el método heurístico.

PONDERACIONES UTILIZADAS PARA EL MAPA DE AMENAZAS POR EL MÉTODO HEURÍSTICO

ESCENARIO	SUSCEPTIBILIDAD	LLUVIA	SISMO
1. Sin sismo y sin lluvia	100%	0%	0%
2. Parcialmente saturado	70%	30%	0%
3. Con sismo	70%	0%	30%
4. Parcialmente saturado y con sismo	40%	30%	30%

- Escenario sin sismo y sin lluvia: este escenario representa las condiciones actuales del terreno, debido a que el barrio presenta un clima tropical cálido seco, donde las precipitaciones se presentan en baja proporción (UIS, 2000). Debido a la naturaleza del suelo asociada a sedimentos

no consolidados, estos drenan rápidamente luego de estar sujetos a lluvias normales, razón por la cual no se reportan niveles freáticos en los sondeos del barrio. Aún bajo estas condiciones, las zonas con amenaza alta constituyen el 22% del área de estudio, la mayoría asociadas a la ladera norte del barrio, adyacente al drenaje. Algunas casas en el centro del barrio y en el suroeste de este presentan amenaza alta, mientras que hacia el oriente del barrio se encuentran sobre zonas de amenaza media, al igual que en el centro del barrio.

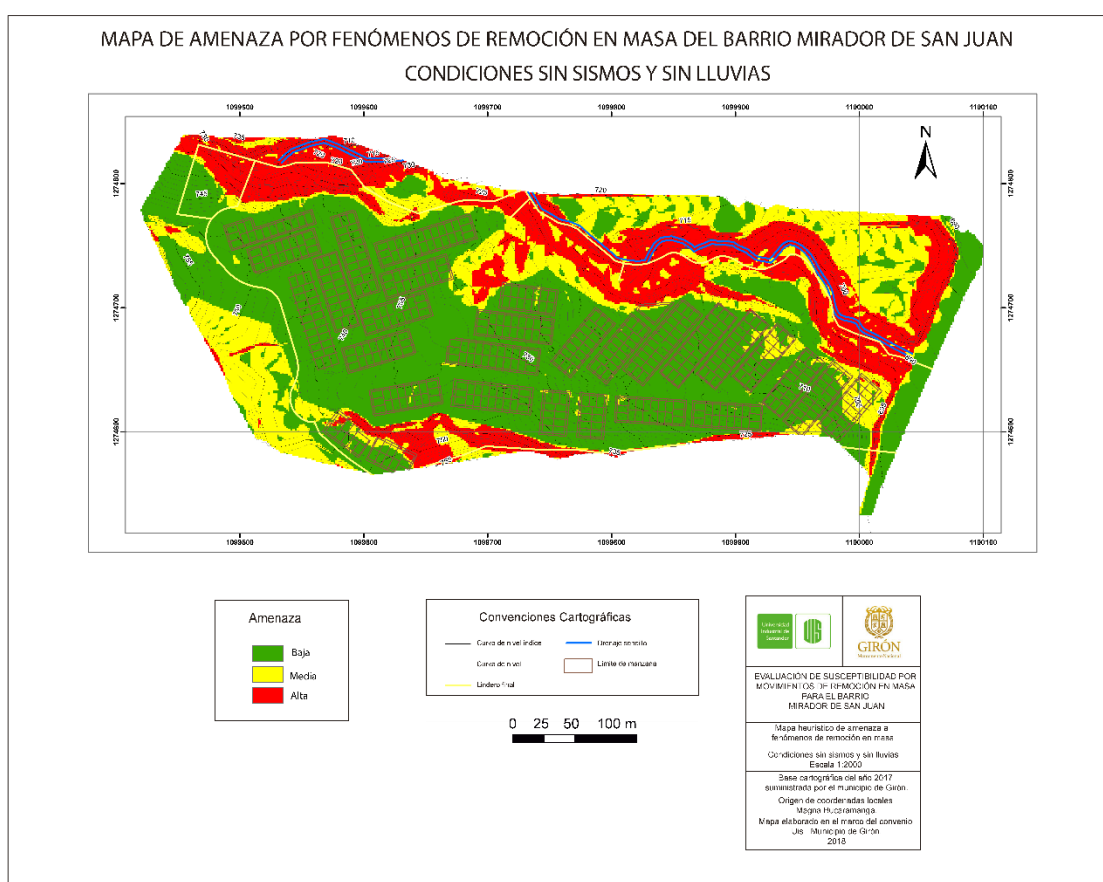


Figura 58. Mapa heurístico de amenaza por fenómenos de remoción en masa para condiciones sin sismos y sin lluvias.

Distribución espacial de amenaza por fenómenos de remoción en masa

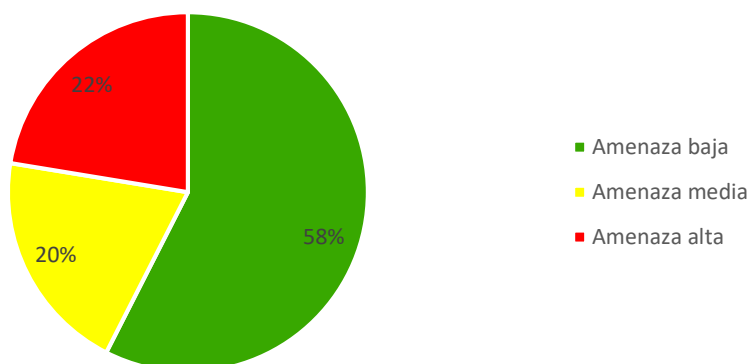


Figura 59. Distribución espacial de amenaza por fenómenos de remoción en masa para condiciones sin sismos y sin lluvias.

- Escenario con lluvias (parcialmente saturado): este escenario representa condiciones de lluvias anormales, lo cual es un importante factor detonante en los materiales constituidos por matriz de tamaño de grano fino. Para este escenario, se evidencia un gran aumento de las zonas con amenaza media, constituyendo el 50% del área de estudio, mientras que las zonas de amenaza alta aumentan 2% con respecto al escenario 1 (Figura 60).
- Escenario con sismo: los sismos pueden ser factores detonantes de cualquier movimiento en masa evidenciado en la zona de estudio. Esta ponderación muestra un aumento de 3% en la cobertura de las áreas con amenaza alta. También se observa un aumento a amenaza media considerable para la UGS Sla en el centro del barrio debido a que se considera que, por la naturaleza de los rellenos antrópicos, presentan una respuesta de mayor aceleración horizontal ante la ocurrencia de sismos (Ingeominas, 2007). Además, algunas casas ubicadas en la entrada del barrio pasan a tener una amenaza alta (Figura 61).

- Escenario con lluvias (parcialmente saturado) y con sismo: este escenario es el más extremo considerado. Bajo este escenario aproximadamente la mitad de las viviendas se encuentra bajo amenaza media, y varias casas en el centro del barrio pasan a estar sometidas a amenaza alta (Figura 63).

A partir de los mapas de amenaza generados por el método heurístico se evidencia claramente que en los taludes del norte, sur y oriente del barrio se concentra la amenaza alta de la zona, lo cual es coherente con el mapa morfodinámico generado (figura 50). Es importante tener en cuenta los resultados del estudio morfodinámico pues la amenaza caracterizada por el método heurístico es general, no obstante, para estudiar con mayor detalle cada zona, se requiere conocer el tipo de movimiento en masa predominante pues el método de análisis es diferente en cada caso.

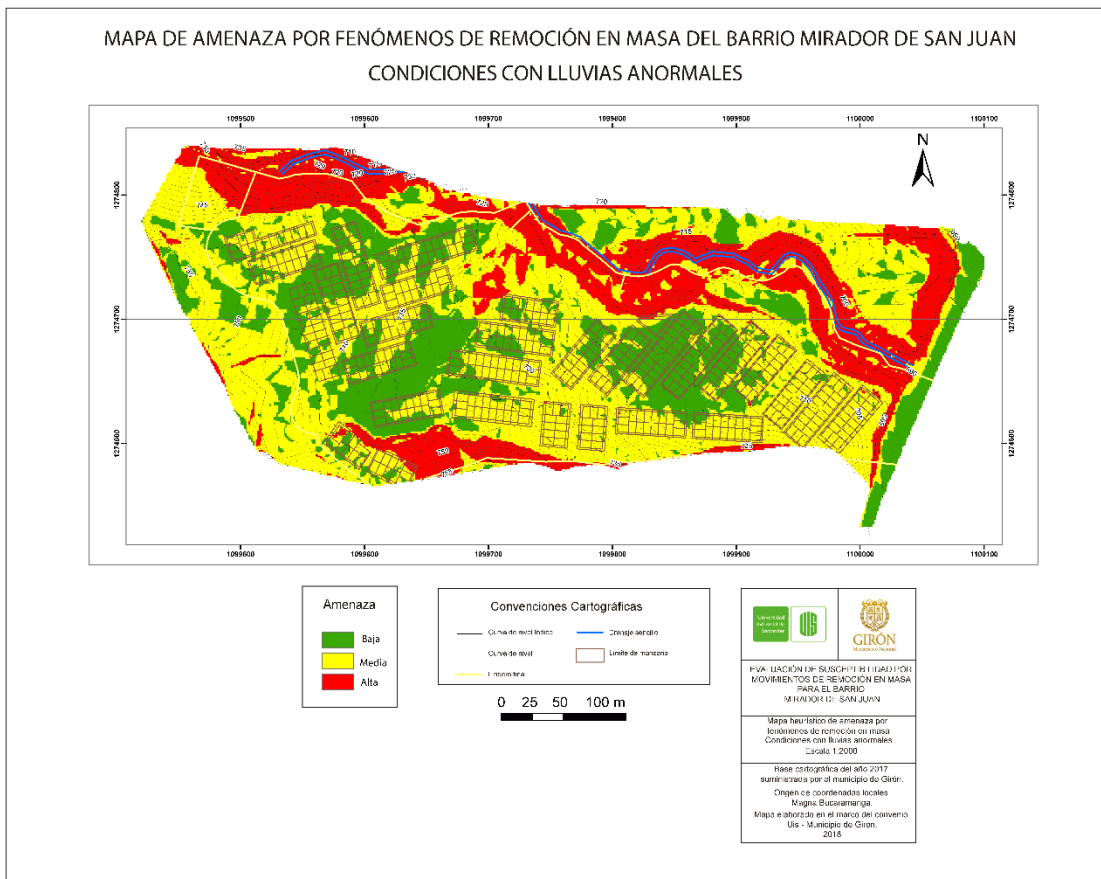


Figura 60. Mapa heurístico de amenaza por fenómenos de remoción en masa para condiciones con lluvias anormales.

Distribución espacial de amenaza por fenómenos de remoción en masa

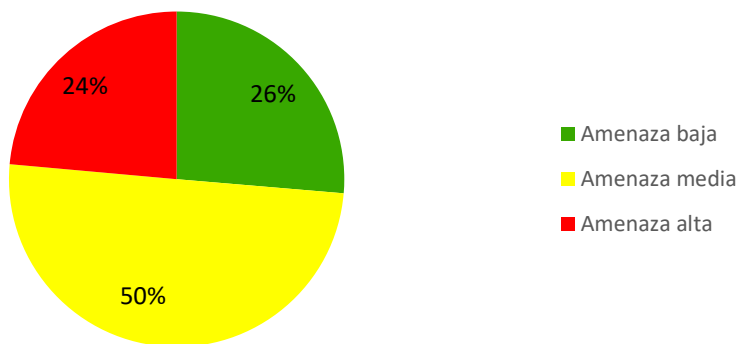


Figura 61. Distribución de amenaza por fenómenos de remoción en masa para condiciones con lluvias anormales.

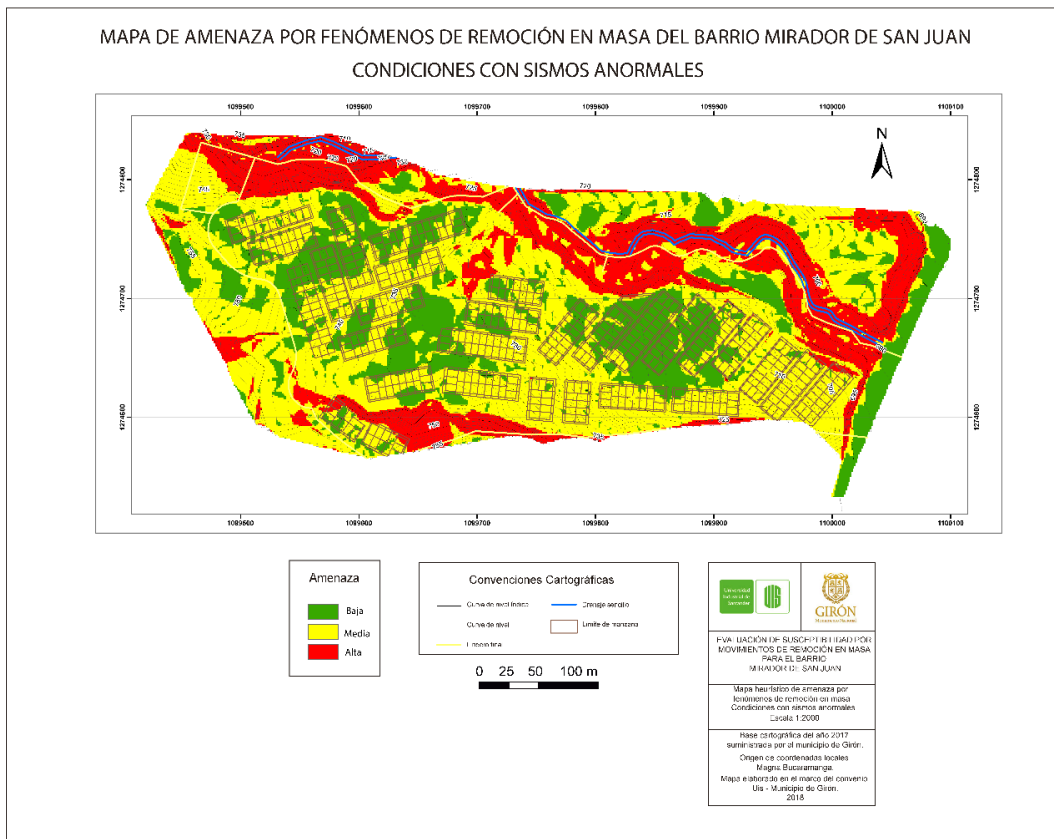


Figura 62. Mapa heurístico de amenaza por fenómenos de remoción en masa para condiciones con sismos anormales.

Distribución espacial de amenaza por fenómenos de remoción en masa

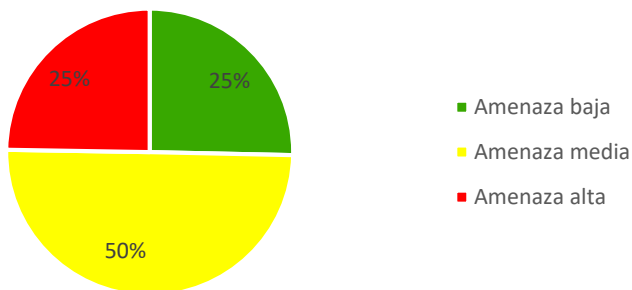


Figura 63. Distribución espacial de amenaza por fenómenos de remoción en masa para condiciones con sismos anormales.

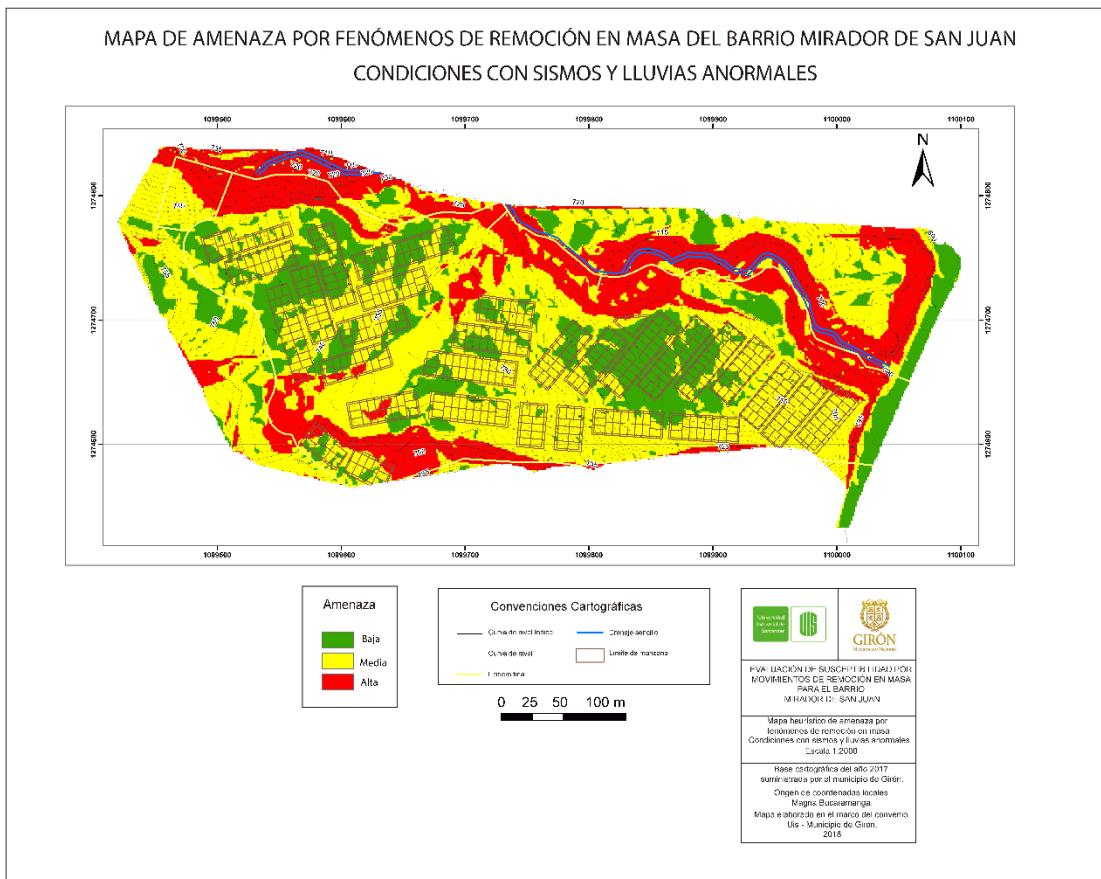


Figura 64. Mapa heurístico de amenaza por fenómenos de remoción en masa para condiciones con lluvias y sismos anormales.

Distribución espacial de amenaza por fenómenos de remoción en masa

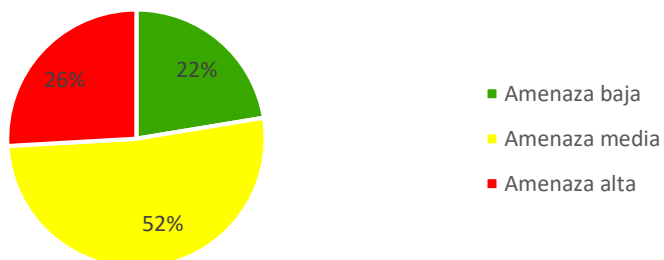


Figura 65. Distribución espacial de amenaza por fenómenos de remoción en masa para condiciones con sismos y lluvias anormales.

6.3.1 Evaluación preliminar de amenaza por métodos determinísticos. Luego de la identificación preliminar de la amenaza mediante los métodos heurísticos, se realizó la evaluación determinística de algunos taludes específicos zonificados en amenaza alta y con evidencias de actividad morfodinámica observadas en campo.

El modelado de los taludes en estudio se realizó mediante el software Slide versión 5.0, desarrollado por Rocscience, el cual permite a partir del método de equilibrio, realizar un análisis determinístico del nivel de seguridad de determinado talud para fallas o movimientos rotacionales. Este nivel de seguridad es evaluado bajo el modelo de Mohr-Coloumb el cual requiere los parámetros de peso unitario, cohesión y fricción. Además, para determinar la probabilidad de falla de cada talud se realiza un análisis probabilístico. Se hace referencia a “análisis preliminar” puesto que no se cuenta con la suficiente cantidad de datos de laboratorio para los modelos, y varios datos como se observa en las tablas de parámetros fueron inferidos a partir de rangos existentes y conocimientos previos de la zona. También, para mejorar la exactitud del modelo se requiere una topografía de mayor detalle.

Adicional a este análisis determinístico se elabora un análisis probabilístico, el cual arroja datos como el factor de seguridad medio, resultado del promedio de todos los factores de seguridad calculados para la superficie de falla mínima global y un parámetro denominado “probabilidad de falla” que se cataloga como la relación ente el número de muestras que fallan sobre el número total de muestras del talud multiplicadas por 100. Estos datos están evidenciados en las imágenes de los modelos. El análisis probabilístico es un gran complemento pues dos taludes con igual factor de seguridad pueden tener distinta probabilidad de falla, lo cual en la práctica es de gran utilidad.

Para el área de estudio se seleccionaron 5 zonas para realizar modelos de estabilidad, 4 de estas ubicadas en el Talud A1, el cual se ha dividido en 4 zonas debido a su extensión lateral y la zona

restante ubicada en el talud B1. A continuación se muestran las tablas de propiedades de los diferentes materiales usados en el modelado de estabilidad de taludes, donde los niveles hacen referencia a cada capa usada y van de tope a base del talud.

Tabla 21.

Parámetros utilizados en el modelado de estabilidad del talud A1, Zona 1.

PARÁMETROS Talud A1, Zona 1

Muestra	Nivel	Peso Unitario (KN/m ³)	Cohesión (KN/m ²)	Fricción (PHI°)
M1 (1)	1-3	21,5	3	24
*1	2	20,5	6	35

Tabla 22.

Parámetros utilizados en el modelado de estabilidad del talud A1, Zona 2.

PARÁMETROS Talud A1, zona 2

Muestra	Nivel	Peso Unitario (KN/m ³)	Cohesión (KN/m ²)	Fricción (PHI°)
M5	1-5	22	10	35
M6	2-4-6	18	12	32
M3	3	21	8	35
*	7	17,5	3	32

Tabla 23.

Parámetros utilizados en el modelado de estabilidad del talud A1, Zona 3.

PARÁMETROS Talud A1, ZONA 3

Muestra	Nivel	Peso Unitario (KN/m ³)	Cohesión (KN/m ²)	Fricción (PHI°)
M2	1	21,5	15	19
M3 (1)	3	20,5	10	29

¹ Los parámetros de algunas muestras (*) han sido estimados por criterio propio de Geólogo Héctor Hernández, supervisor del proyecto.

*1 2 20 6 35

Tabla 24.

Parámetros utilizados en el modelado de estabilidad del talud A1, Zona 4.

PARÁMETROS Talud A1, ZONA 4				
Muestra	Nivel	Peso Unitario (KN/m³)	Cohesión (KN/m²)	Fricción (PHI°)
M1	1	17	7	36
*	2	21,5	6	35

Tabla 25.

Parámetros utilizados en el modelado de estabilidad del talud B1, Zona 1.

PARÁMETROS Talud B1, zona 1				
Muestra	Nivel	Peso Unitario (KN/m³)	Cohesión (KN/m²)	Fricción (PHI°)
Material 1*	1	15,5	3	19
Material 2*	2	15,7	4	23
Material 3*	3	19	9	25
Material 4*	4	19,3	9	22
Material 5*	5	20	9	22

A partir de los modelos anteriormente mencionados se definieron los escenarios bajo los cuales se trabajó y los métodos de análisis que se aplicaron, que en este caso son Ordinario o Fellenius (1927), Bishop (1955), Janbú (1968) y Spencer (1967) establecidos en CDMB (2009) como requisitos mínimos para el análisis de estabilidad, cada uno evaluando y dando prioridad a determinado parámetro.

¹ Los parámetros de algunas muestras (*) han sido estimados por criterio propio de Geólogo Héctor Hernández, supervisor del proyecto.

Los escenarios que se trabajan se relacionan con la variación de la saturación de cada material, la cual en suelos granulares (suelos del área de estudio) debido a la baja ascensión capilar es baja, con escenarios de subsaturación para condiciones de lluvias anómalas en general. El coeficiente de aceleración pseudoestática del terreno (Tabla 19) es el otro parámetro que varía en cada escenario, que para dar cumplimiento a la resolución 1294 establecida por la CDMB (2009) supera la mínima cantidad establecida de 0,15 g en el coeficiente sísmico horizontal, dando un valor de 0,2 g. De esta manera, la máxima saturación considerada para representar la ocurrencia de lluvias anormales es de 0,5 y la aceleración sísmica horizontal que representa la ocurrencia de sismos anormales es de 0,2 g.

Para categorizar la amenaza por procesos de remoción en masa, la CDMB (2009) a través de las normas geotécnicas propone a partir de un análisis estático (condición actual) y un análisis pseudo estático (escenario con sismicidad) la respectiva clasificación basados en el valor del factor de seguridad (tablas 16 y 17).

Tabla 26.

Categorías de zonificación de amenaza para condición estática en función del factor de seguridad, tomado de CDMB (2009).

ZONIFICACIÓN DE AMENAZA PARA CONDICIÓN ESTÁTICA	
NIVEL DE AMENAZA	FACTOR DE SEGURIDAD
Amenaza Baja (B)	$FS \geq 1,5$
Amenaza Media (M)	$1,25 \leq FS \leq 1,50$
Amenaza Alta (A)	$0,00 \leq FS \leq 1,25$

Tabla 27.

Categorías de zonificación de amenaza para condición pseudoestática en función del factor de seguridad, tomado de CDMB (2009).

ZONIFICACIÓN DE AMENAZA PARA CONDICIÓN PSEUDOESTÁTICA	
NIVEL DE AMENAZA	FACTOR DE SEGURIDAD
Amenaza Baja (B)	$FS \geq 1,2$
Amenaza Media (M)	$1,00 \leq FS \leq 1,20$
Amenaza Alta (A)	$0,00 \leq FS \leq 1,00$

6.3.1.1 Talud A. El talud A1 como se ha descrito anteriormente dada su extensión lateral de más de 200 metros y sus cambios de morfología se ha dividido en zonas a las cuales se les ha realizado el respectivo análisis de estabilidad.

- Zona 1 (figura 65). Según el análisis de estabilidad para esta zona, en base al método de Janbú (método con el menor valor del factor de seguridad) el factor de seguridad es 1,347 lo cual designa que para condiciones normales el talud es estable, con probabilidad de falla 0,200% (Figura 66).

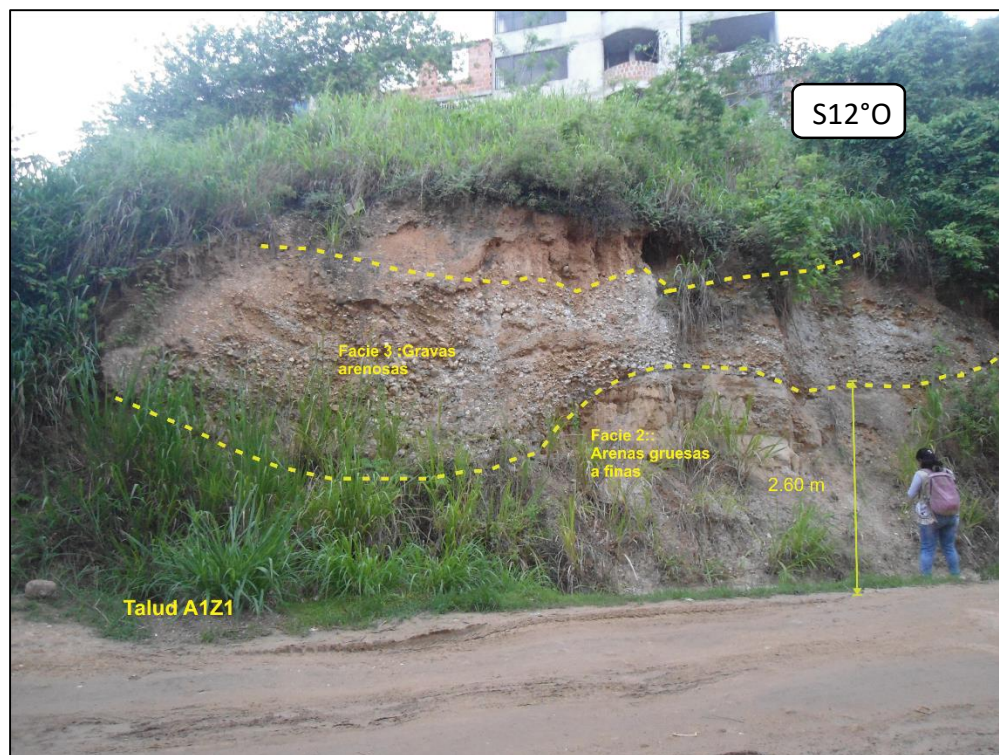


Figura 66. Talud A1Z1.

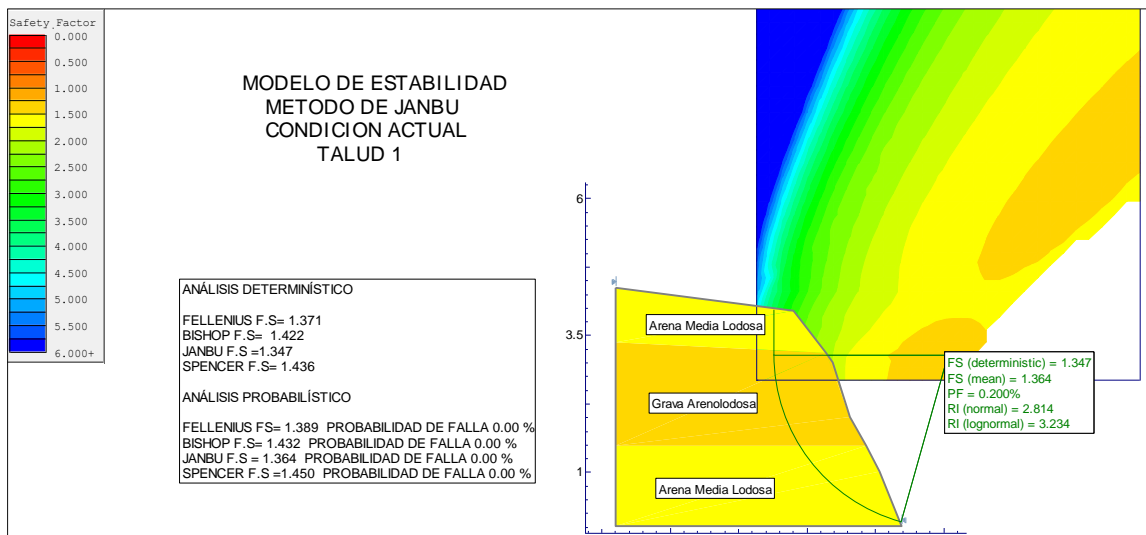


Figura 67. Modelo de estabilidad en condiciones actuales o normales, sin sismo y sin lluvia. Talud A1, Zona 1.

En condición parcialmente saturada, con una saturación de 0,2 en los niveles 1 y 3 (material arenoso), se obtiene un valor de factor de seguridad de 1,587, lo cual evidencia que esta zona es estable, sin probabilidad de falla (Figura 67).

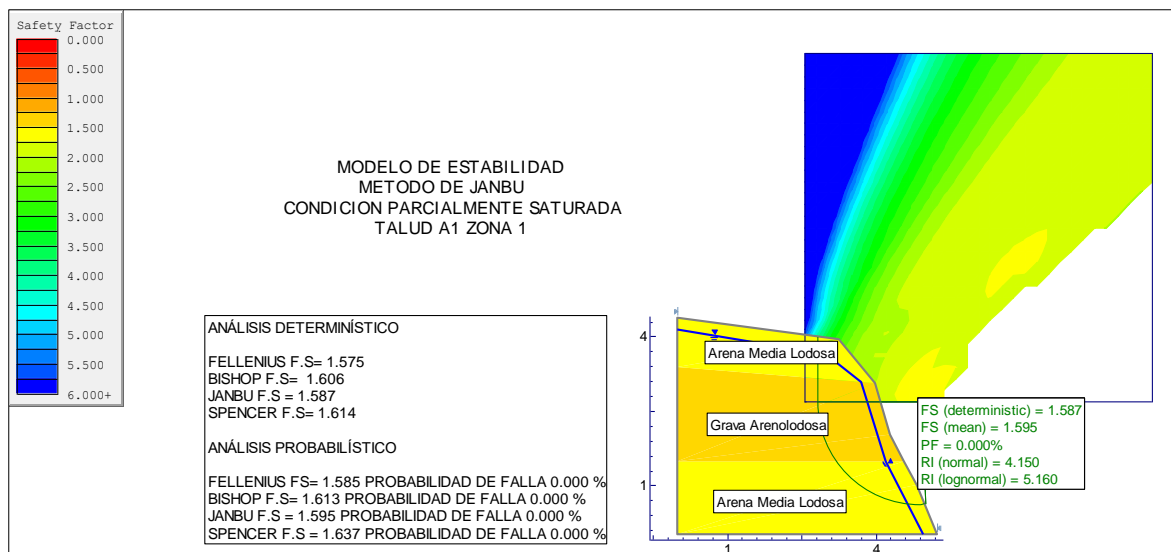


Figura 68. Modelo de estabilidad en condición con lluvias anormales (parcialmente saturado) talud A1, Zona 1.

Seguido para el análisis con sismicidad se obtiene un factor de seguridad de 1,199 con una probabilidad de falla de 4,700 %, representando un nivel de amenaza media lo cual justifica la aplicación de obras de contención (figura 68).

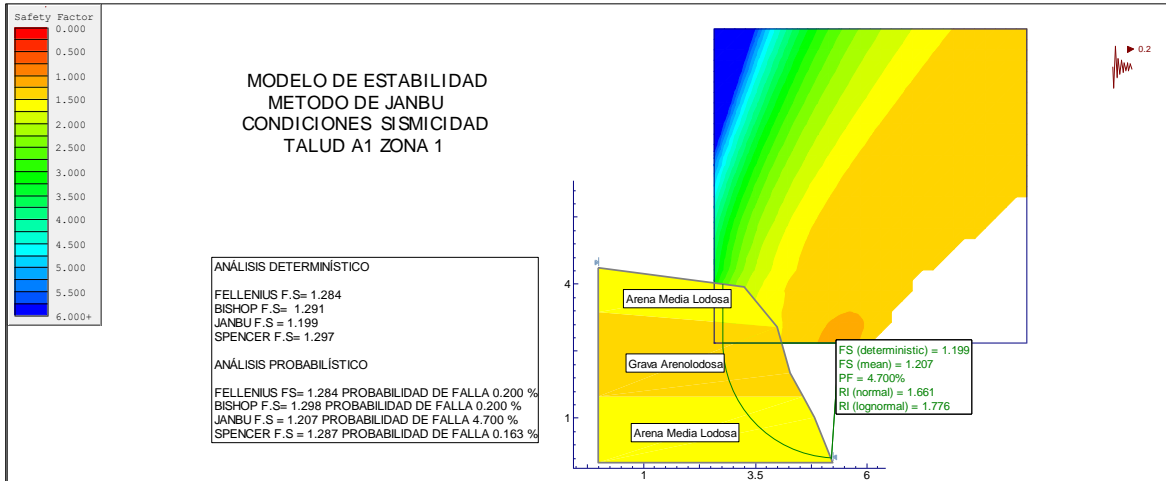


Figura 69. Modelo de estabilidad en condiciones con sismicidad talud A1, Zona 1.

Para el siguiente escenario se aplican condiciones de saturación parciales en las arenas y se aplica una aceleración sísmica de 0.2 g, para este escenario el resultado del factor de seguridad es de 1,191, el cual para condiciones pseudoestáticas representa un nivel de amenaza medio, justificable para la realización de obras de contención (Figura 69).

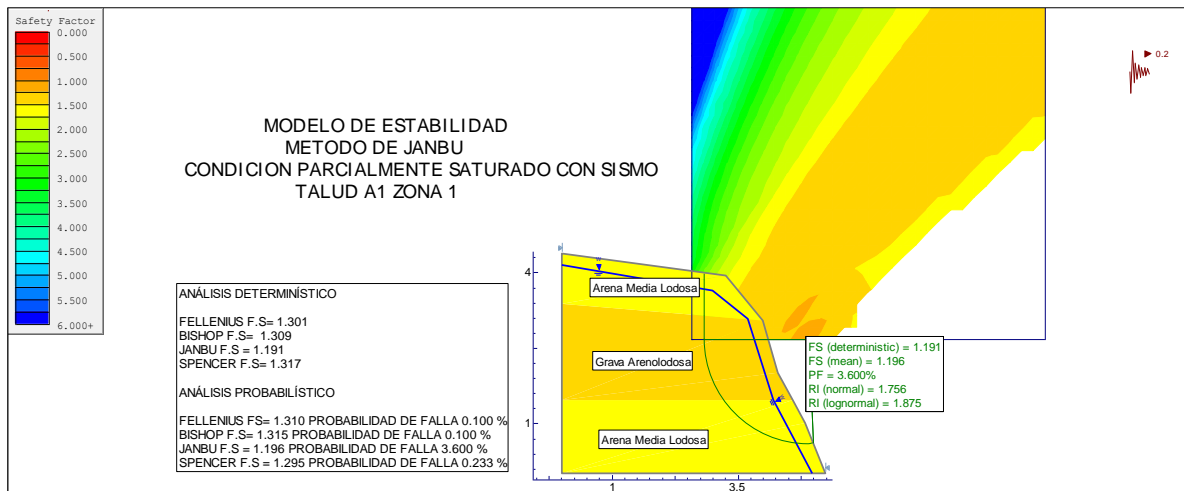


Figura 70. Modelo de estabilidad en condiciones con lluvias anormales (parcialmente saturado) y con sismicidad talud A1, Zona 1.

Tabla 28.

Cuadro resumen de los valores de factor de seguridad obtenidos para el talud A1, zona 1.

<i>FACTORES DE SEGURIDAD DEL TALUD A1 ZONA 1</i>				
<i>CONDICIÓN</i>	Fellenius	Bishop	Janbú	Spencer
1. Condición actual	1,371	1,422	1,347	1,436
2. Parcialmente saturado	1,575	1,606	1,587	1,614
3. Condición con sismicidad	1,284	1,291	1,199	1,297
4. Parcialmente saturado y con sismicidad	1,301	1,309	1,191	1,317

- Zona 2 (Figura 70). Para el primer escenario aplicado el cual es en condiciones normales sin saturación y sin sismicidad, el factor de seguridad que se obtiene es de 1,313, para las condiciones estáticas este valor refleja un nivel de amenaza media con probabilidad de falla de 0,000% (Figura 71).

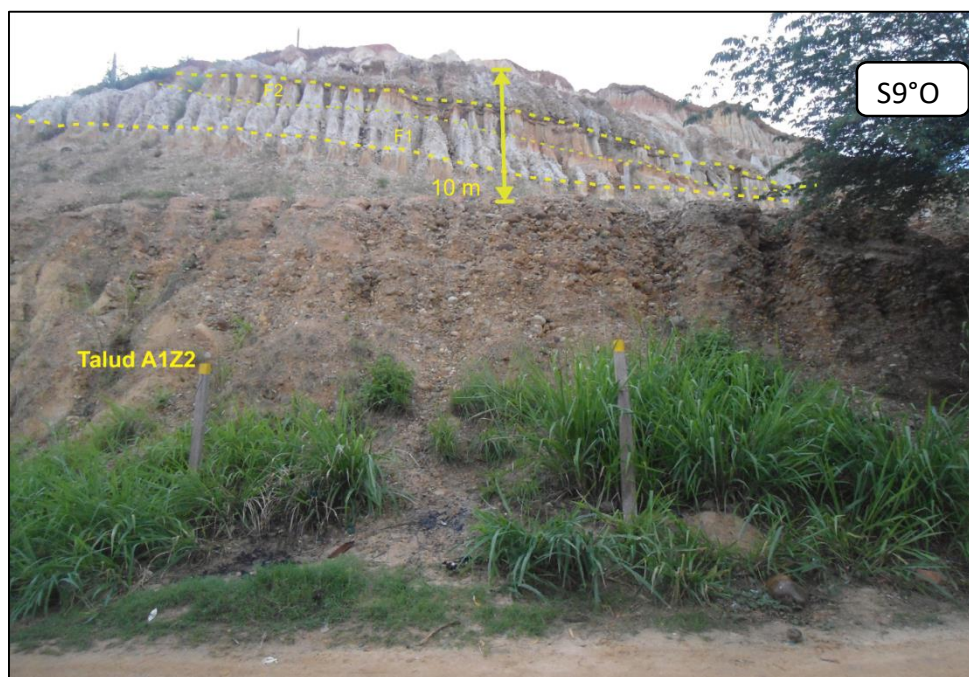


Figura 71. Talud A1Z2.

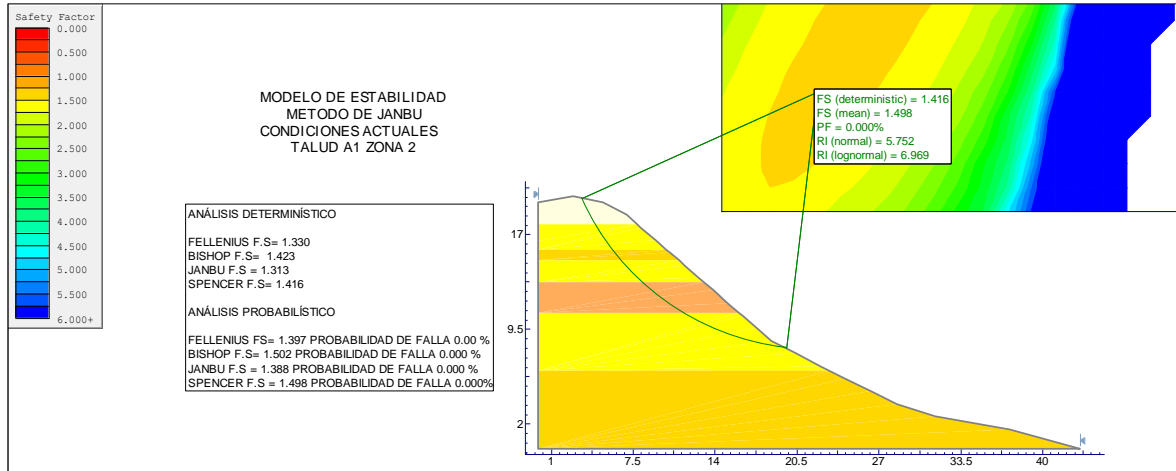


Figura 72. Modelo de estabilidad en condiciones normales A1, Zona 2.

Siguiendo la aplicación de sismicidad en el respectivo modelo, se obtiene un factor de seguridad de 0,939 con una probabilidad de falla de 60,900 %, clasificando una alta amenaza en estas condiciones y por lo tanto genera una inestabilidad en el talud (Figura 72).

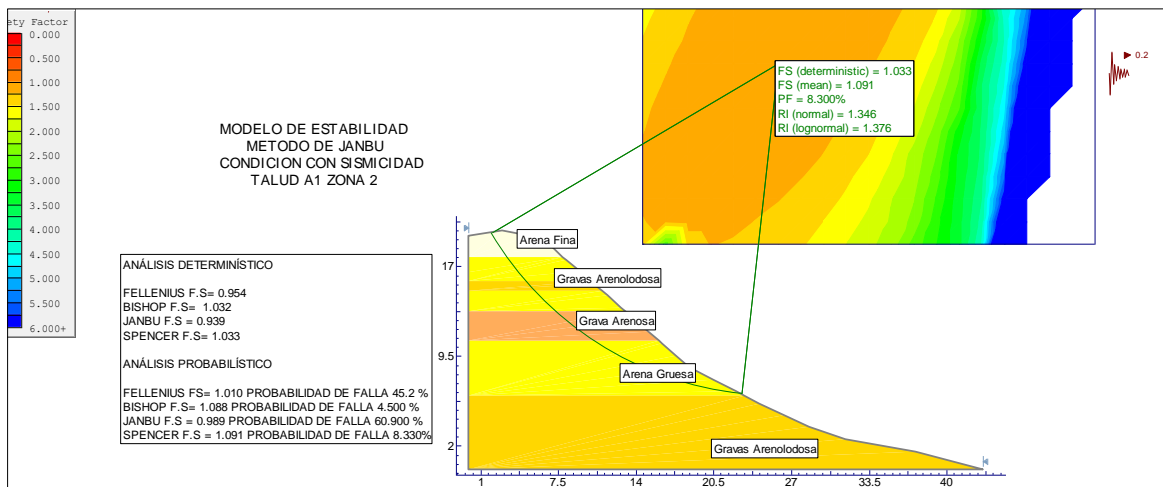


Figura 73. Modelo de estabilidad en condiciones con sismicidad talud A1, Zona 2.

Para el siguiente escenario el cual estudia la respuesta del modelo a condiciones parcialmente saturadas se observa que el factor de seguridad es de 1,198 lo cual lo categoriza como amenaza media (Figura 73).

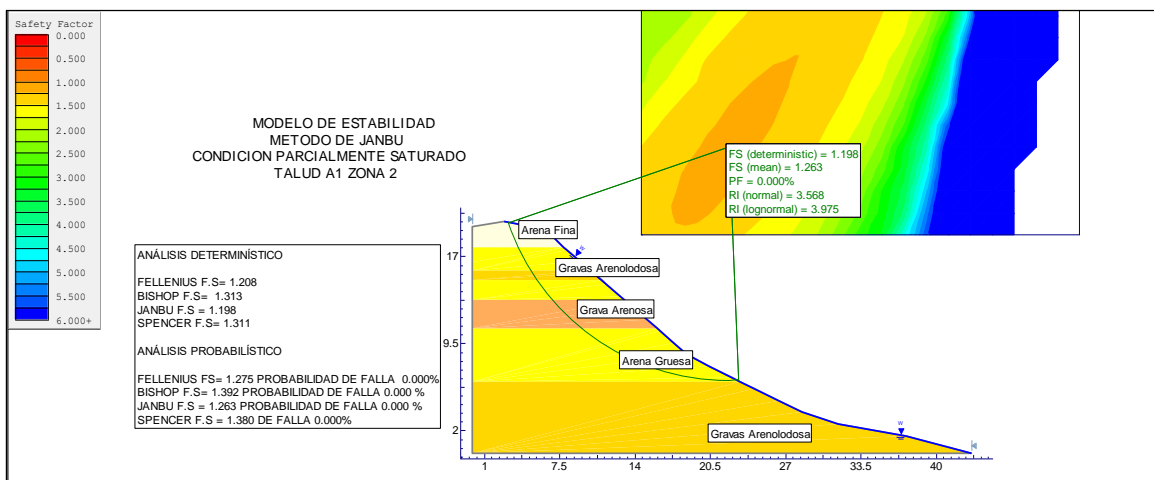


Figura 74. Modelo de estabilidad en condiciones con lluvias anormales (parcialmente saturado) talud A1, Zona 2.

En el último escenario modelado para la zona 2, en condiciones extremas se observa que el factor de seguridad es considerablemente bajo y la probabilidad de falla es de 94,000% (Figura 74) lo que indica que la amenaza es alta en la zona y que se requieren obras de contención.

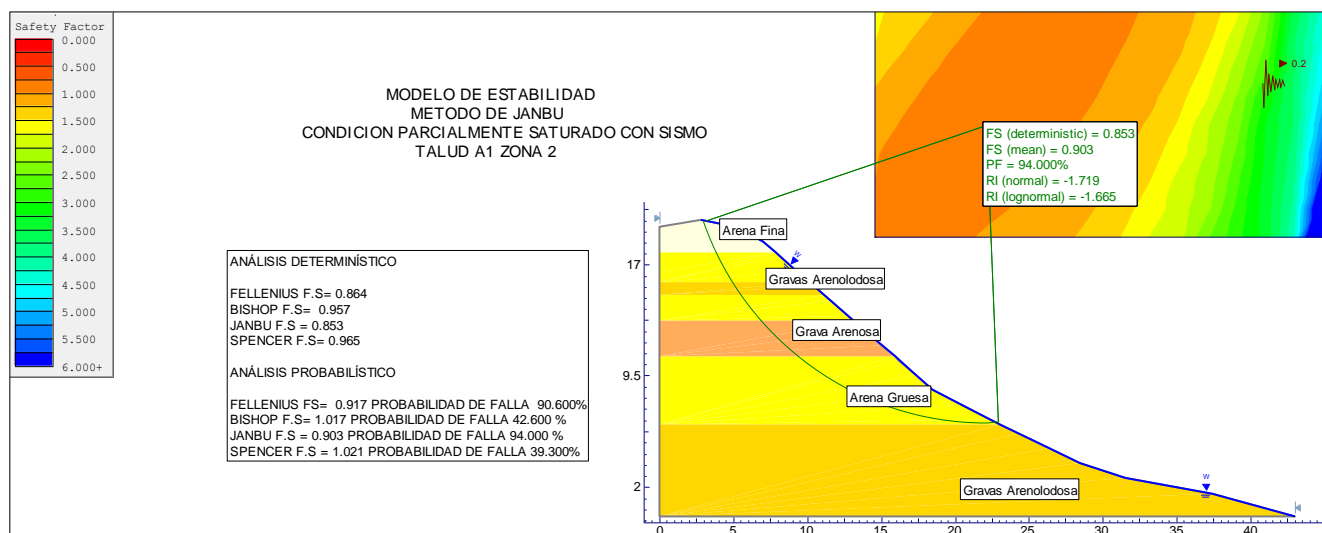


Figura 75. Modelo de estabilidad en condiciones con lluvias anormales (parcialmente saturado) y con sismo talud A1, Zona 2.

Tabla 29.

Cuadro resumen de los valores de factor de seguridad obtenidos para el talud A1, zona 2.

<i>FACTORES DE SEGURIDAD DEL TALUD A1 ZONA 2</i>				
<i>CONDICION</i>	Fellenius	Bishop	Janbú	Spencer
<i>1. Condición actual</i>	1,330	1,423	1,313	1,416
<i>2. Parcialmente saturado</i>	1,208	1,313	1,198	1,311
<i>3. Condición con sismicidad</i>	0,954	1,032	0,939	1,033
<i>4. Parcialmente saturado y con sismicidad</i>	0,864	0,957	0,853	0,965

- Zona 3 (Figura 75). Las condiciones normales modeladas en esta zona proveen un factor de seguridad de 1,394 con el método Janbú (valor más bajo de entre los métodos aplicados) (Figura 76), entonces, para condiciones estáticas este factor de seguridad indica que el nivel de amenaza es medio. Por lo tanto, la zona 3 del talud A1 es estable bajo condiciones normales.

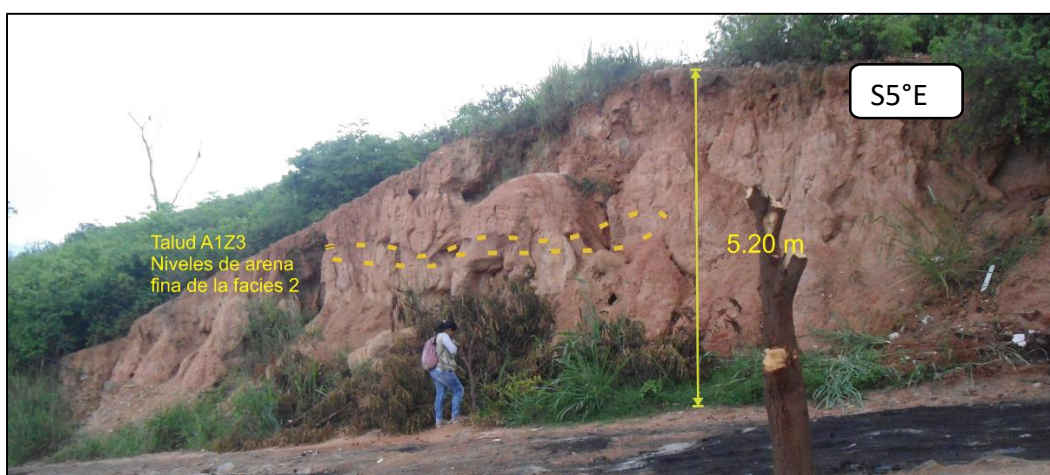


Figura 76. Talud A1Z3.

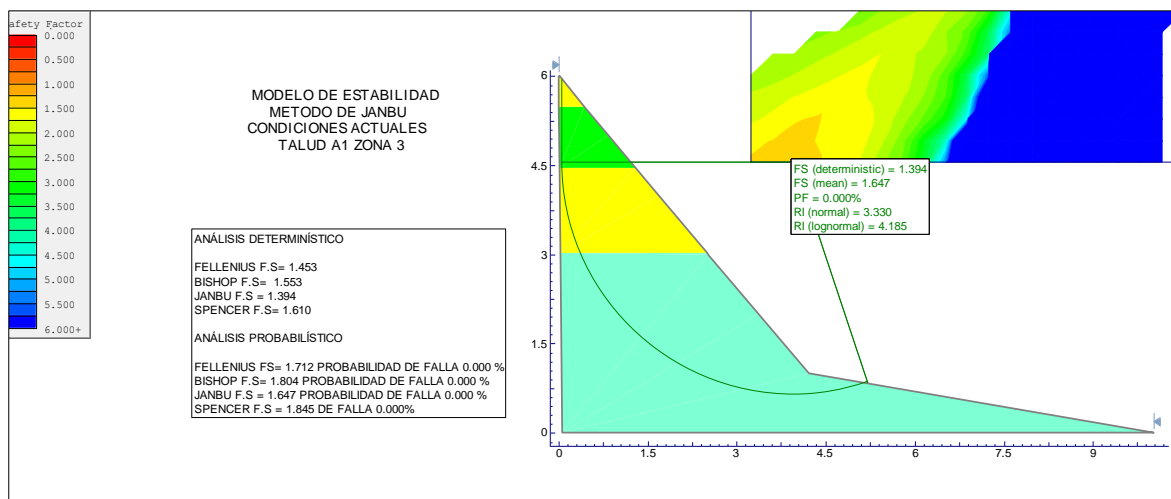


Figura 77. Modelo de estabilidad en condiciones normales talud A1, Zona 3.

En el escenario con sismicidad con aceleración sísmica asignada de 0,2 g, se determina un factor de seguridad de 1,072 (Figura 77), para condiciones pseudoestáticas este valor indica un nivel de amenaza medio por ende es necesario la implementación de obras de contención.

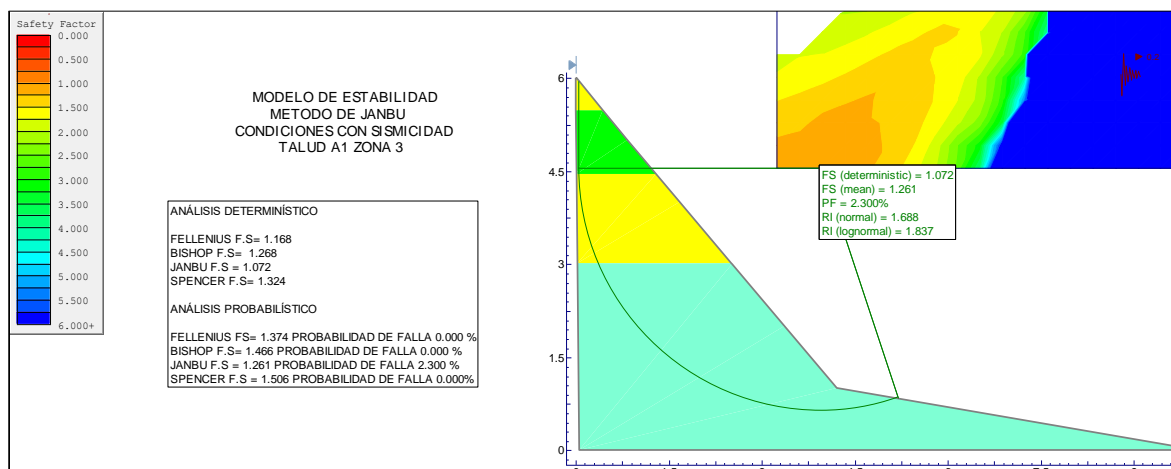


Figura 78. Modelo de estabilidad en condiciones con sismicidad talud A1, Zona 3.

El siguiente escenario para la zona 3 es parcialmente saturado, en el cual se evidencia un factor de seguridad de 1,287 (figura 78), y una probabilidad de falla de 0.00% a partir de estos datos se

ubica en un nivel de amenaza medio por lo tanto se hace necesario la implementación de obras de contención.

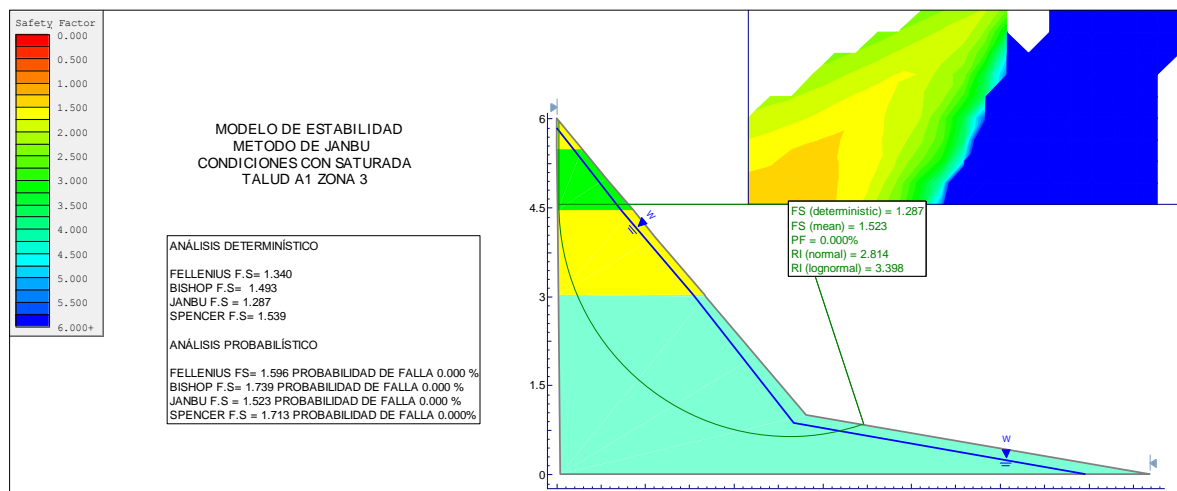


Figura 79. Modelo de estabilidad en condiciones con lluvias anormales (parcialmente saturado) talud A1, Zona 3.

Para el escenario de condiciones críticas, se establece una condición parcialmente saturada y con aceleración sísmica de 0,2 g; el factor de seguridad obtenido es 0,991 (Figura 79) el cual establece un nivel de amenaza alto.

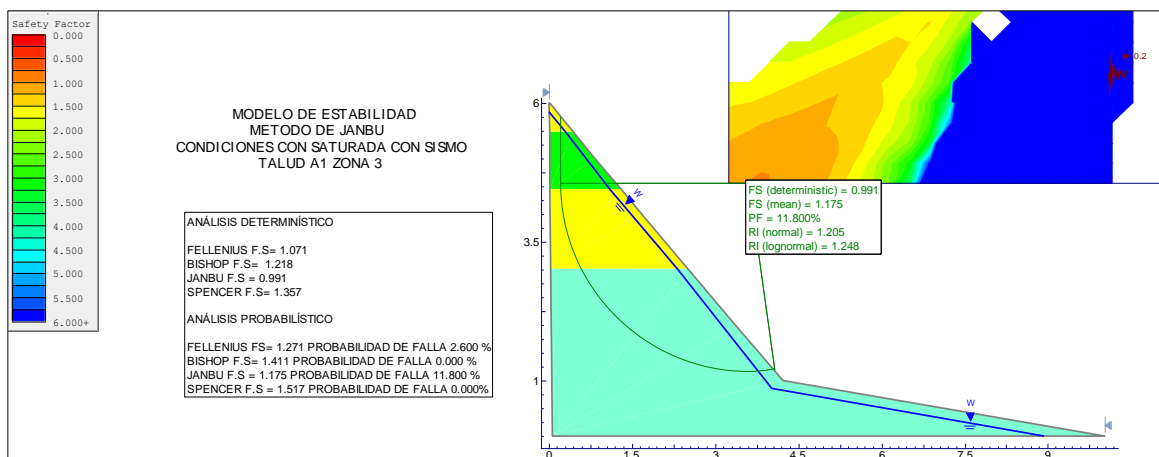


Figura 80. Modelo de estabilidad en condiciones con lluvias anormales (parcialmente saturado) y con sismos talud A1, Zona 3.

Tabla 30.

Cuadro resumen de los valores de factor de seguridad obtenidos para el talud A1, zona 3.

FACTORES DE SEGURIDAD DEL TALUD A1 ZONA 3

CONDICION	Fellenius	Bishop	Janbú	Spencer
1. Condición actual	1,453	1,553	1,394	1,610
2. Parcialmente saturado	1,340	1,493	1,287	1,539
3. Condición con sismicidad	1,168	1,268	1,072	1,324
4. Parcialmente saturado y con sismicidad	1,071	1,218	0,991	1,357

- Zona 4 (Figura 80). Para condiciones normales o estáticas (figura 81) con una carga vertical de 60 KN/m, la cual representa el efecto de una vivienda de 4 plantas ubicada sobre el talud, el factor de seguridad es de 1,127 analizado bajo el método Janbú, este valor de factor de seguridad ubica la zona 4 en un nivel de amenaza alto, para lo cual bajo condiciones estáticas o normales se hace necesario la atención e intervención a esta zona.



Figura 81. Talud A1Z4.

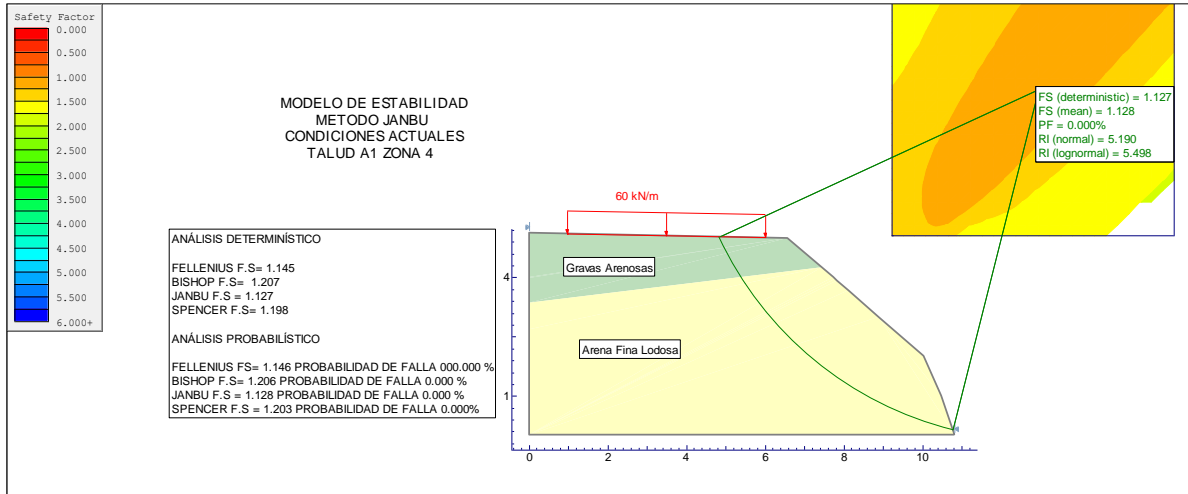


Figura 82. Modelo de estabilidad en condiciones normales A1, Zona 4.

En condiciones con sismicidad, el factor de seguridad es considerablemente bajo 0,885 con una probabilidad de falla 100,000% (Figura 82). A partir de estos datos el nivel de amenaza es alto y al considerar la carga en la corona del talud para esta zona se hace imprescindible un tratamiento especial para esta zona.

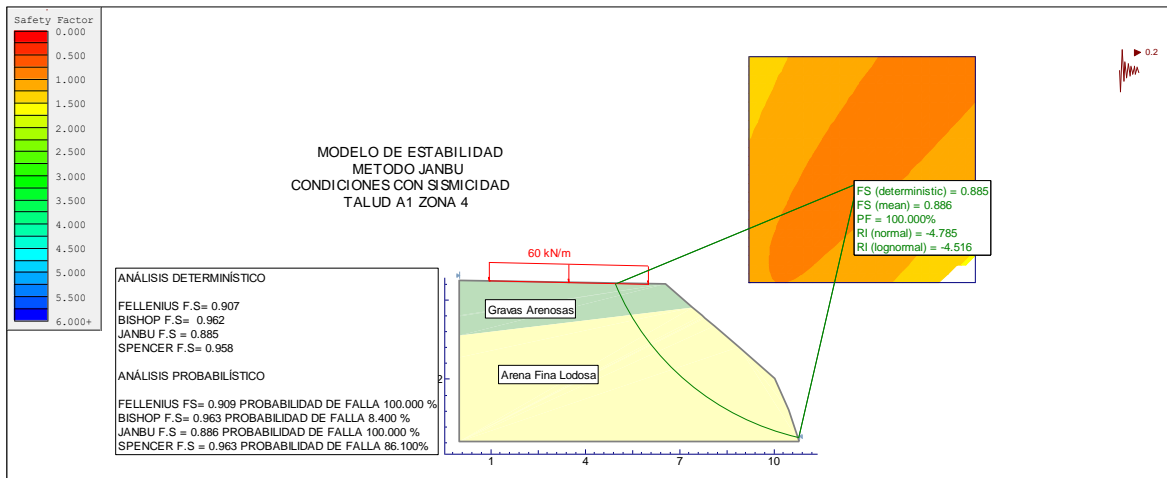


Figura 83. Modelo de estabilidad en condiciones con sismicidad y lluvias anormales (parcialmente saturado) Talud A1, Zona 4.

Para condiciones parcialmente saturadas como lo muestra el escenario 3 para la zona 3 (figura 83) el factor de seguridad 0,966 aumenta con respecto al anterior y la probabilidad de falla disminuye, sin embargo, el nivel de amenaza continúa siendo alto y se requiere un tratamiento especial.

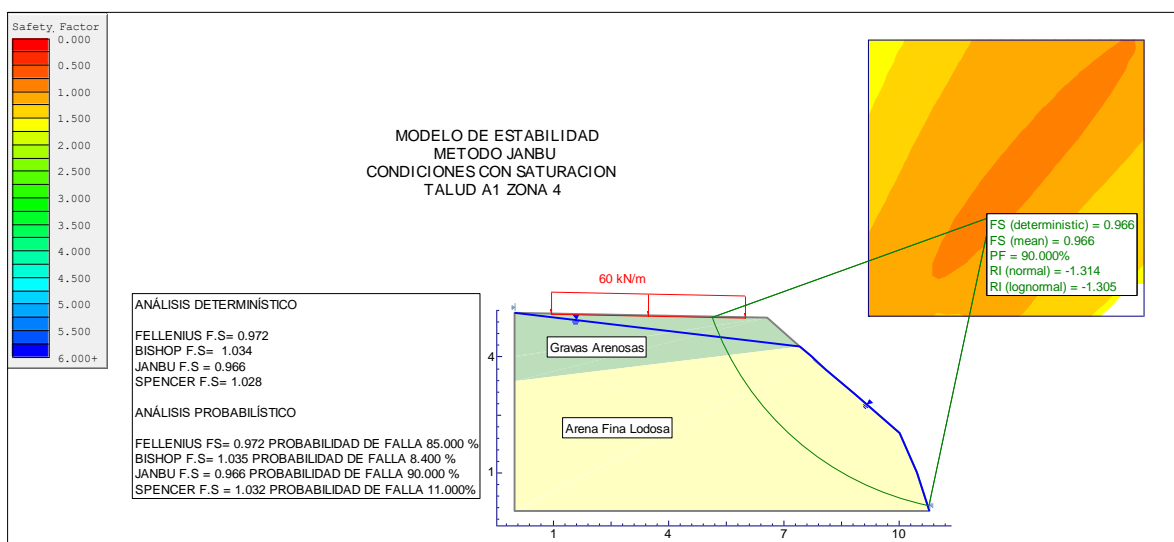


Figura 84. Modelo de estabilidad en condiciones con lluvias anormales (parcialmente saturado) talud A1, Zona 4.

Para el ultimo escenario de la zona 4 se tiene la sismicidad y la saturación parcial (0,5 en las arenas), en este caso el factor de seguridad es de 0,673 y la probabilidad de falla igual que en el escenario 2 es de 100,000% (figura 84), estos datos indican una zona de amenaza de nivel alto para lo cual se deben tomar medidas de tratamiento especial.

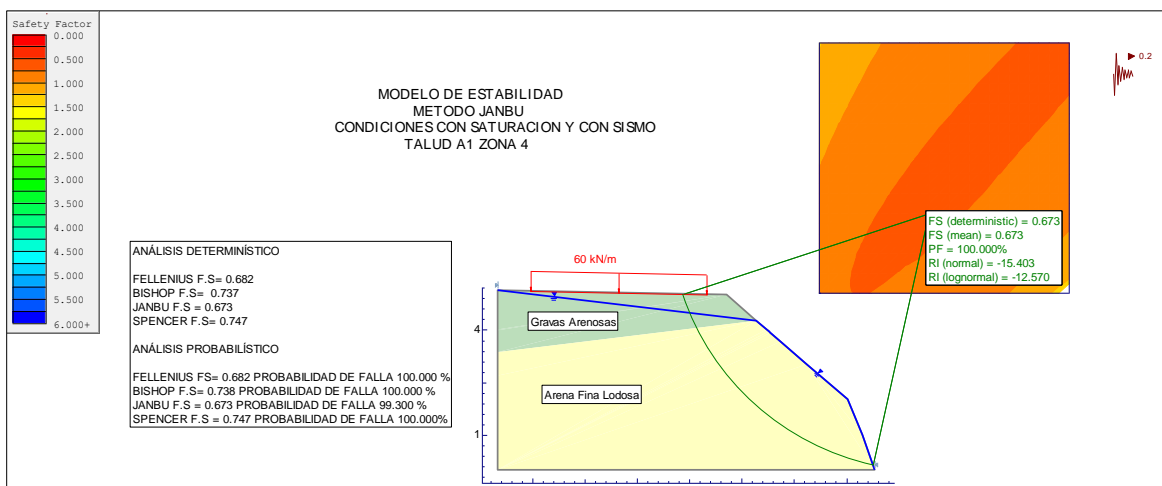


Figura 85. Modelo de estabilidad en condiciones con sismo y lluvias anormales (parcialmente saturado) talud A1, Zona 4.

Tabla 31.

Cuadro resumen de los valores de factor de seguridad obtenidos para el talud A1, zona 4.

FACTORES DE SEGURIDAD DEL TALUD A1 ZONA 4

CONDICION	Fellenius	Bishop	Janbú	Spencer
1. Condición actual	1,145	1,207	1,127	1,198
2. Parcialmente saturado	0,972	1,034	0,966	1,028
3. Condición con sismicidad	0,907	0,962	0,885	0,958
4. Parcialmente saturado y con sismicidad	0,682	0,737	0,637	0,747

La zona 4 del talud A1 es una de las zonas más críticas del barrio Mirador de San Juan en la corona de este talud se encuentra una vivienda de 4 plantas, la cual ejerce una fuerza sobre el talud de aproximadamente 60 KN/m lo que convierte a esta zona en un foco de especial atención dados los resultados de los modelos realizados.

6.3.1.2 Talud B1. El talud se ubica contiguo a la quebrada que pasa en sentido NW-SE en el Norte del barrio (Figura 85). El análisis de determinado talud se da en base a la información de sondeos provistos por la secretaría de infraestructura de la alcaldía de Girón, pues no se cuenta con afloramientos de los materiales del talud.



Figura 86. Talud B1.

Para condiciones Normales este talud posee un factor de seguridad de 0,849 bajo el método de Janbú (Factor de seguridad de menor valor), con una probabilidad de falla de 92,200 % (Figura 86), lo que clasifica a esta zona como de amenaza alta en condiciones estáticas y requiere de un tratamiento especial por las entidades competentes.

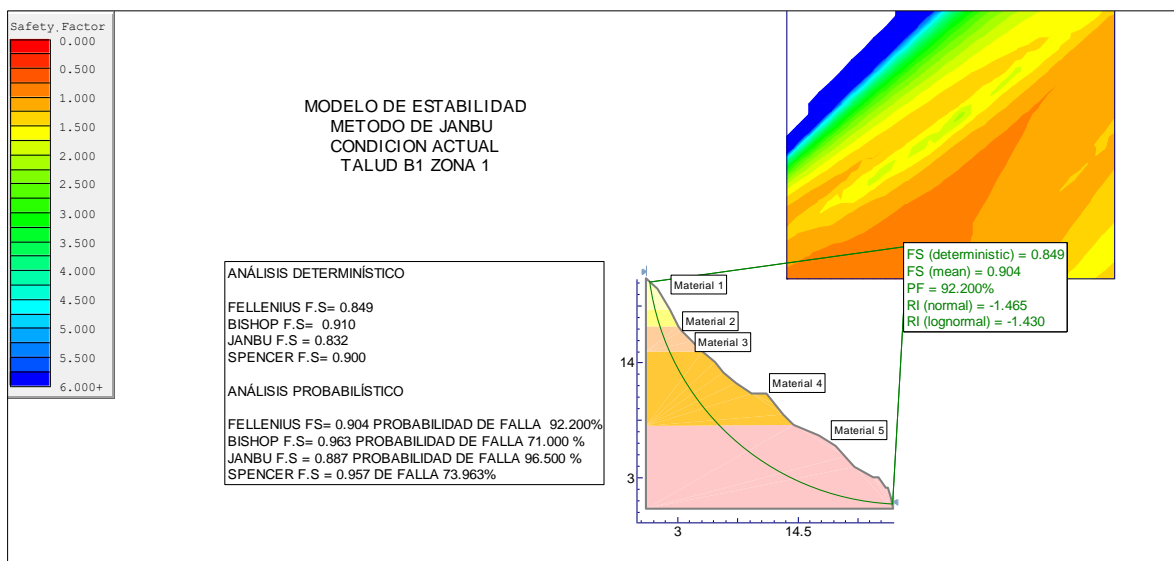


Figura 87. Modelo de estabilidad en condiciones normales talud B1, Zona 1

Para condiciones parcialmente saturadas el factor de seguridad disminuye de manera considerable a 0,660 y la probabilidad de falla es de 100,000 % (figura 87), bajo condiciones pseudo estáticas este factor de seguridad indica una amenaza alta.

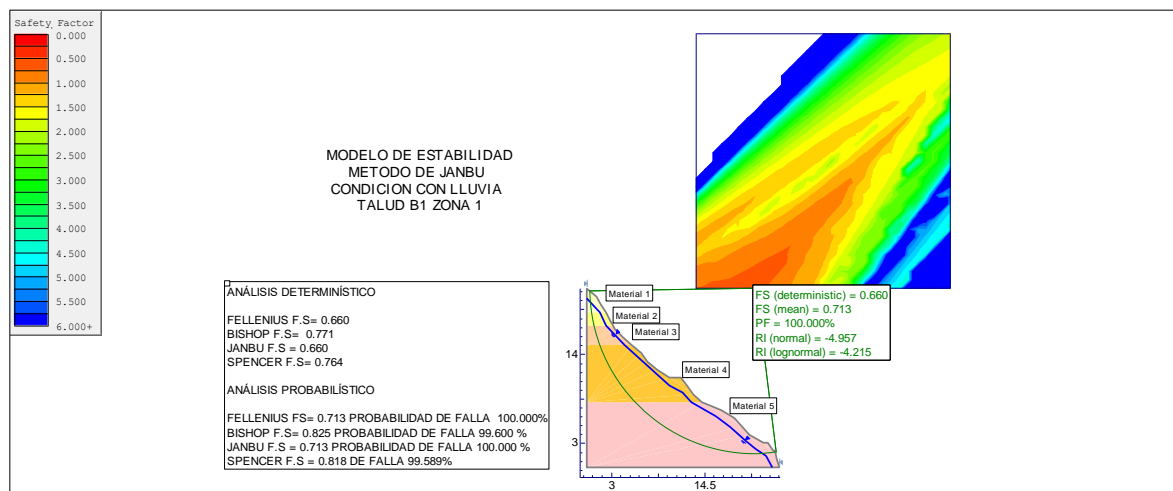


Figura 88. Modelo de estabilidad en condiciones con lluvia (parcialmente saturado) talud B1, Zona

1.

Para los siguientes dos escenarios con sismicidad (figura 88) y escenario con saturación parcial y sismicidad (figura 89) los factores de seguridad son 0,713 y 0,638 respectivamente ambos con una probabilidad de falla de 100.000 %, En condiciones pseudo estáticas se determina para ambos un nivel de amenaza alto y se hace necesario un tratamiento especial a esta zona.

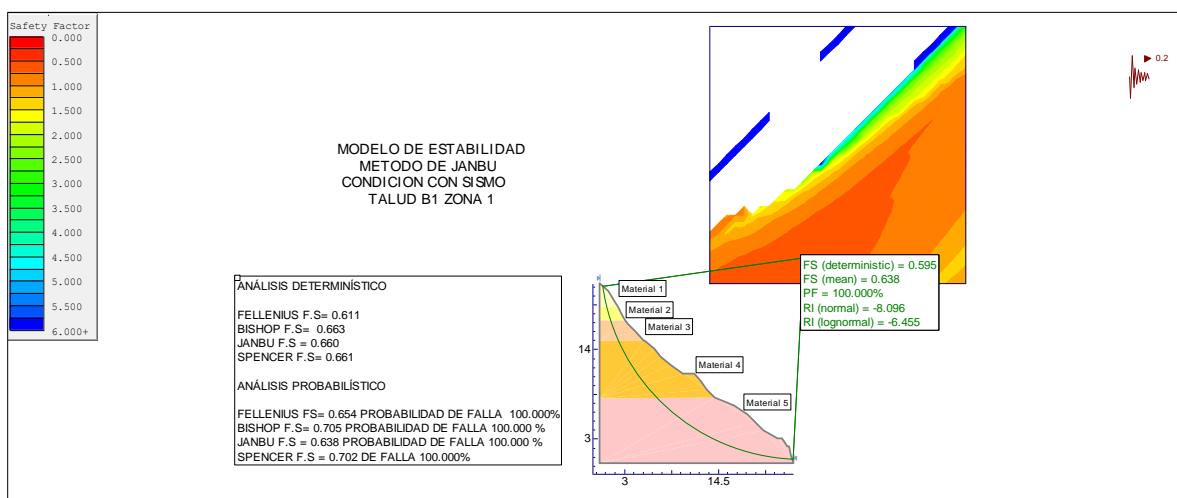


Figura 89. Modelo de estabilidad en condiciones con sismo talud B1, Zona 1.

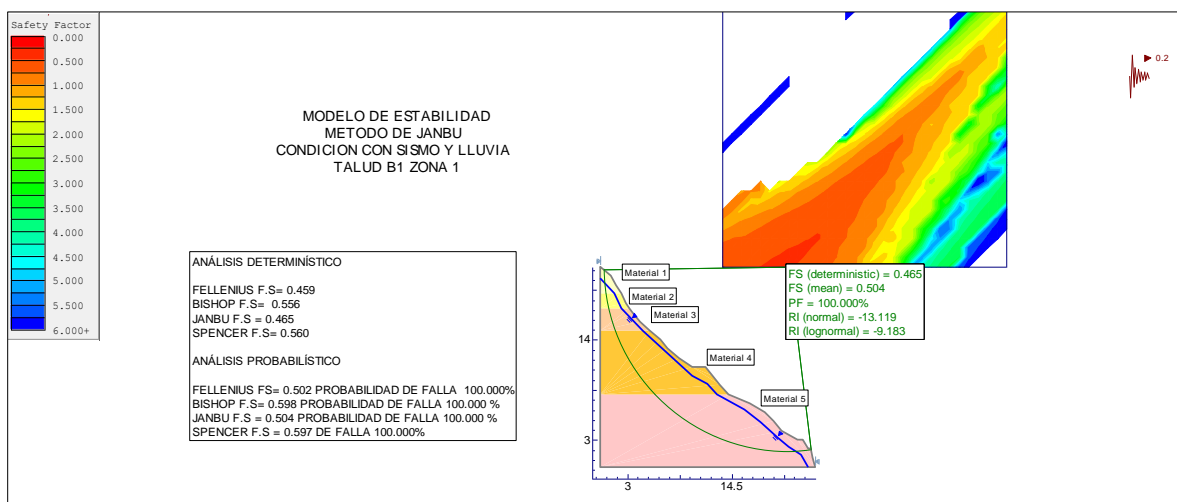


Figura 90. Modelo de estabilidad en condiciones con lluvias (parcialmente saturadas) y con sismo talud B1, Zona 1.

Tabla 32.

Resumen de los valores del factor de seguridad obtenidos para el talud B1 Zona 1.

<i>FACTORES DE SEGURIDAD DEL TALUD B1 ZONA 1</i>				
<i>CONDICION</i>	Fellenius	Bishop	Janbú	Spencer
1. Condición actual	0,849	0,910	0,832	0,900
2. Parcialmente saturado	0,660	0,771	0,660	0,764
3. Condición con sismicidad	0,611	0,663	0,660	0,661
4. Parcialmente saturado y con sismicidad	0,459	0,556	0,456	0,560

Para el talud B1 se determina desde las condiciones normales que el nivel de amenaza es alto, sin embargo, no se ha modelado el soporte que la vegetación presenta en la zona, lo cual sin lugar a duda genera efectos en la estabilidad del terreno, además, es importante mencionar que sobre el talud existe una carga dinámica asociada a una vía de tráfico de vehículos de variadas cargas. También, se debe considerar que aledaño al pie de este talud se encuentra vivienda de una planta la cual se encontraría en alto riesgo en caso de no ser intervenida con prontitud el talud en estudio, esto basado en los resultados del modelamiento y en observaciones campo en donde algunos desplazamientos rotacionales y traslacionales son identificados.

A partir de los diferentes modelos de todas las zonas se infiere que, aunque las condiciones extremas que propone el escenario 4 poseen baja probabilidad de ocurrencia, se deben hacer las respectivas adecuaciones a las respectivas zonas indicadas ya que por lo general bajo saturación o sismo la amenaza es media y en algunos casos alta, lo que resulta crítico para la comunidad del municipio de Girón.

7. Conclusiones

- La Unidad Geológica Superficial (UGS) predominante en la zona de estudio es Sft3, suelo gravoso del miembro Órganos con una distribución espacial con respecto a las UGS presentes en la zona de estudio de 89%.
- En el análisis de las columnas estratigráficas levantadas en el Talud A1, a través de sus diferentes zonas se pueden reconocer distintas facies cuyas características litológicas y estructuras sedimentarias conllevan a plantear que dichas unidades fueron depositadas en el pie de lo que sería el abanico aluvial de Bucaramanga.
- El material arenoso presente en la zona clasificado como facies 2, presenta un nivel de saturación mayor al que se presenta en las facies 1 y 3, lo que representa que las facies 2 son más propensas a poseer una menor estabilidad bajo los diferentes escenarios evaluados, y por lo tanto se relaciona directamente la mayor presencia de ésta facie con un nivel de amenaza mayor, como es reflejado en el modelo de la zona 4 del talud A1.
- No se logró identificar rasgos indicadores claros de actividad neotectónica, no obstante, los datos estructurales revelan que, para la zona de estudio, las capas sedimentarias del segmento gravoso del miembro Órganos se encuentran buzando entre 11 y 16 grados hacia el suroeste, lo cual es favorable para la estabilidad de esta unidad en los taludes del norte y sur del barrio.
- El barrio corresponde a la subunidad de ladera denudada, y está constituido por 10 elementos geomorfológicos con orígenes antrópico o denudacional. El elemento dominante espacialmente es el correspondiente a las laderas terraceadas con 65%, no obstante, elementos como las laderas muy inclinadas, los cortes verticales de ladera y los llenos de escombros caracterizados por su inestabilidad geotécnica, constituyen cerca del 20% del área.

- Los principales movimientos en masa identificados en la zona son caída de detritos, deslizamientos traslacionales y rotacionales, condicionados principalmente por las pendientes del terreno y por el tipo de material, donde materiales de tamaño grava en adelante son más susceptibles a la caída de detritos mientras que materiales finos a los deslizamientos.
- El análisis heurístico de susceptibilidad revela que el principal factor condicionante de inestabilidad es la morfometría o las pendientes de las laderas, seguido por la geomorfología, las unidades geológicas superficiales y los usos del suelo. Además, se concluyó que aproximadamente el 22% de la zona presenta alta susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa.
- El análisis heurístico de amenaza revela que para escenarios intermedios con lluvias anómalas o con sismos anómalos, cerca del 25% de la zona se encuentra en amenaza alta y cerca del 50% en amenaza media.
- El modelado de estabilidad de taludes realizado en la zona de estudio revela que estos presentan en amenaza media a alta en escenarios intermedios con lluvias anómalas y sin sismo, o con sismo y lluvias, lo cual implica que se requiere de obras civiles para la prevención de desastres ocasionados por la activación de movimientos de remoción en masa.
- Se requiere una especial atención a la zona 4 del talud A1 y a la zona 1 del talud B1 ya que el nivel de amenaza indicado a través del modelado para estas zonas es alto, lo cual es coherente con las observaciones y datos tomados en campo.

8. Recomendaciones

- Elaborar un levantamiento topográfico detallado del área estudiada y las zonas de influencia el cual permita realizar con mayor detalle la cartografía y los perfiles de los taludes modelados.
- Determinar las condiciones específicas bajo las cuales se han realizado los llenos antrópicos en la zona y sus características para estudiar la respuesta de cada uno de estos a diferentes escenarios detonantes de inestabilidad.
- Realizar más ensayos y pruebas de clasificación geotécnicas para los materiales de la zona, para mejorar la exactitud de los modelos planteados.
- Elaborar un estudio detallado que permita en base a los perfiles de meteorización, reconocer los niveles de saturación de cada material ya que basados en la saturación se crean escenarios para determinar el factor de seguridad.
- Llevar a cabo estudios más detallados enfocados a la identificación de fallas que pudiesen estar afectando la zona de estudio.
- Realizar estudios hidrogeológicos en las unidades de la zona que permitan identificar la relación entre el tiempo e intensidad de lluvias y la saturación de los materiales, así como también identificar las direcciones de flujo del agua una vez se infiltra en el subsuelo.
- Estandarizar la clasificación de los usos de suelo y cobertura bajo la metodología y clasificación Corine land cover, como lo ha determinado el Ideam en el 2004 para las diferentes entidades públicas de la región.
- Complementar el estudio de actividad morfodinámica con la caracterización y zonificación de la erosión hídrica (laminar, surcos y en cárcavas).

- Actualizar los datos de aceleraciones sísmicas según los estudios más recientes de la zona y las tendencias y lineamientos de las entidades de gestión de riesgo.
- Llevar a cabo análisis determinísticos de movimientos de tipo caída de rocas y movimientos traslacionales para el área de estudio con el fin de obtener un mapa determinístico de amenaza.
- Analizar la viabilidad de intervención en el área y ejecutar obras o tratamientos especiales si es el caso en cada una de las zonas en donde la amenaza se presenta como media y alta.
- Mejorar la gestión por parte de la escuela de geología en la vinculación de la academia con las entidades públicas y privadas para propiciar y generar más oportunidades para los estudiantes en el ámbito laboral, y de igual manera retribuir a la comunidad con la prestación del servicio.

Referencias bibliográficas

- Alleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and environment*, 58(1), 21-44.
- Álvarez, J., & Sandoval, E. (2012). *Estudio para la determinación del ángulo de fricción interno a partir del ensayo de penetración estándar para materiales del área metropolitana de Bucaramanga*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Arche, A. (2010). *Sedimentología: del proceso físico a la cuenca*. Madrid: Consejo superior de investigaciones científicas.
- Argüello, D., & Calderón, L. (2014). *Estado del arte del uso del ensayo SPT-T y las correlaciones obtenidas para los parámetros del modelo Mohr-Coulomb*. Bogotá D.C: Universidad Católica de Colombia.
- Carvajal, H., Cortés, R., Romero, F., Montero, J., & Calderon, Y. (2004). *Propuesta metodológica para el desarrollo de la cartografía geomorfológica para la zonificación geomecánica* (Vol. I). Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS).
- CDMB. (29 de Diciembre de 2009). Resolución 001294 del 29 de diciembre de 2009. Bucaramanga.
- Colombia, Ley N°1523 de 2012. 24 de abril de 2012.
- Cruz, L., & Caballero, V. (2007). *Guía de de sedimentología para geólogos*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Geotecnología Ltda.; Corporación Autónoma Regional Para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga. (2005). *Documento de Diagnóstico: Amenazas de inundación y erosión en el Río de Oro*. Informe de consultoría, Bucaramanga.

- González, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- IDEAM. (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). (2001). *Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga*. Bogotá: INGEOMINAS.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). (2007). *Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta*. Bogotá: INGEOMINAS.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). (2009). *Zonificación de amenaza por movimientos en masa para algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta. Revisión*. Bogotá: INGEOMINAS.
- James, N., & Walker, R. (1992). *Facies models: response to sea level change*. Geological Association of Canada.
- Jiménez, G., Speranza, F., Faccena, C., Bayona, G., & Mora, A. (2015). Magnetic stratigraphy of the Bucaramanga alluvial fan: Evidence for a ≤ 3 mm/yr slip rate for the Bucaramanga - Santa Marta Fault, Colombia. *Journal of South America Earth Sciences*, 57, 12-22.
- Julivert, M. (1963). Nuevas observaciones sobre la estratigrafía y tectónica del Cuaternario de los alrededores de Bucaramanga. *Boletín de geología*(15), 41-59.
- Julivert, M. (1968). *Lexique stratigraphique international Amerique Latine Colombia (Premiere Partie)* (Vol. V (4a)). París: Centre National de la Recherche Scientifique.

- Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial (MAVDT). (2010). Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10. 1625. Bogotá D.C.
- Ministerio de vivienda, ciudad y territorio, Decreto N°1807 de 2017. República de Colombia, 19 de septiembre de 2014.
- Municipio de Girón. (17 de Agosto de 2011). Resolución 1977. Girón, Santander.
- Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV). (1998). Manual de laboratorio de geotecnia.
- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. (2007). *Movimientos en masa en la región andina: Una guía para la evaluación de amenazas*. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Servicio Geológico Colombiano. (2012). *Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de movimientos en masa escala 1:100.000*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Servicio Geológico Colombiano. (2015). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Suarez, J. (2009). *Deslizamientos: Análisis geotécnico* (Vol. I). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Universidad Industrial de Santander. (2000). *Plan de ordenamiento territorial de San Juan de Girón 2000 - 2009*. Universidad Industrial de Santander, Centro de estudios regionales, Bucaramanga.
- Vargas, G. (2000). Criterios para la clasificación y descripción de movimientos en masa. *Boletín de geología*, 22(37), 39-67.
- Vargas, G., & Niño, A. (1992). *Patrones de fracturamiento asociados a la falla Bucaramanga*. Tesis. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, J., & Restrepo, H. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12

Bucaramanga y H - 13 Pamplona, Departamento de Santander. *Boletín geológico*, XXI(1-3), 144.