

Zonificación De Susceptibilidad Por Movimientos En Masa Y Análisis De Vulnerabilidad Física, De Viviendas Y Su Exposición, En El Costado Occidental Del Barrio Bariloche Etapa Ii - Piedecuesta

John Jairo Baez Lizarazo

Trabajo De Grado Para Optar Al Título De Magíster En Geotecnia

Director

Germán Alonso Reyes Mendoza

Phd (C), Msc, Geólogo

Codirector

Wilfredo Del Toro Rodriguez

Msc, Ingeniero Civil

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela De Ingeniería Civil

Magister En Geotecnia

Bucaramanga

2020

## Agradecimientos

*A mis padres, por su entrega, dedicación, y cariño. Por ellos todo, y para ellos todo.*

*A Germán Reyes, director de proyecto, por su compromiso y apoyo.*

*Al profesor Wilfredo del Toro y en su extensión a toda la Escuela de Ingeniería Civil UIS por mi formación como ingeniero y como geotecnista, por sus atenciones y acompañamiento.*

*Al Área Metropolitana de Bucaramanga, dónde empezó mi camino como profesional, por todo su apoyo documental, técnico y logístico.*

*A Barbara María Jaimes, quien puso su atención en el sector de Bariloche para su tesis de pregrado en Geología, motivando también años después la realización de este documento.*

*A la comunidad del área de estudio y a los diferentes líderes comunitarios que contribuyeron con sus recuerdos, documentos, y compañía.*

*A Ingesab SAS y mi socio y amigo Luis Carlos Sánchez, porque el proyecto de vida va tomando forma.*

*A todas las personas que directa o indirectamente participaron en la ejecución de este proyecto.*

*A ti, que llegaste con todo cuando más necesitaba un apoyo, y a ese pequeño nosotros que está creciendo y es desde ya el proyecto más importante de todos.*

## Tabla de contenido

Introducción	22
1. Objetivos	26
1.1. General	26
1.2. Objetivos específicos	26
2. Generalidades y objeto de estudio	28
2.1. Planteamiento del problema de investigación	28
2.2. Justificación y normativa	30
2.3. Antecedentes y estudios previos	31
2.4. Metodología para la investigación y tiempos de ejecución	32
3. Área de estudio, descripción del evento, y atención de la emergencia	34
3.1. Breve historia, ubicación y extensión de la zona de estudio	34
3.2. Cronología y mapa del evento geomorfológico	36
3.3. Fase de crisis y manejo de comunidades	39
3.4. Fase de recuperación y estabilización del talud	43
4. Caracterización geoambiental: geología y unidades superficiales	47
4.1. Marco geotectónico	47
4.2. Unidades litoestratigráficas locales	51
4.2.1. <i>Formación jordán (jj).</i>	52
4.2.2. <i>Formación girón (jg).</i>	55
4.2.3. <i>Depósitos coluviales antiguos (qca).</i>	59
4.2.4. <i>Depósitos coluviales recientes (qcr).</i>	60
4.2.5. <i>Depósitos de taludes y bermas (qdt).</i>	62
4.2.6. <i>Depósitos de llenos de origen antrópico (qlen).</i>	62
4.3. Geología estructural	63

4.3.1.	<i>Fallas geológicas locales</i>	64
4.3.2.	<i>Análisis de sistemas de fracturación</i>	67
4.4.	Unidades geológicas para ingeniería (ugi)	71
4.4.1.	<i>Roca sedimentaria terrígena, estratiforme y tectonizada (rstet).</i>	72
4.4.2.	<i>Roca sedimentaria terrígena masiva, estratiforme y granulometría fina</i>	74
4.4.3.	<i>Suelo traslocado antiguo (strca).</i>	75
4.4.4.	<i>Suelo traslocado subreciente (strcs).</i>	76
4.4.5.	<i>Suelo traslocado, en tope de ladera aplanada para cultivos (strcc).</i>	77
4.4.6.	<i>Suelo y roca excavados para estabilización de taludes (srext).</i>	77
4.4.7.	<i>Suelo de hábitats urbanos (shaur).</i>	79
5.	Caracterización geoambiental: geomorfología, morfometría, geoformas, hidrología superficial, y usos del suelo	81
5.1	los sistemas naturales y la interacción humana, en contextos urbanos	81
5.2	dominio morfogenético	82
5.3	clasificación y jerarquías geomorfológicas	83
5.4.	Morfología y morfometría	83
5.5.	Mapa de unidades locales y elementos geomorfológicos	91
5.5.1.	<i>Unidades de origen urbano (u)</i>	92
5.5.2.	<i>Unidades de origen denudacional (d)</i>	96
5.5.3.	<i>Unidades de origen morfoestructural (e)</i>	99
5.6.	Hidrología superficial	99
5.7.	Coberturas vegetales y usos del suelo	108
6.	Zonificación de la susceptibilidad geomorfológica	116
6.1.	Cartografía detallada de la susceptibilidad geomorfológica	116
6.1.1.	<i>Geología</i>	116
6.1.2.	<i>Pendiente</i>	119
6.1.3.	<i>Geomorfología</i>	120
6.1.4.	<i>Cobertura y ocupación del suelo</i>	120
6.1.5.	<i>Unidades geológicas para ingeniería ugi</i>	121
6.1.6.	<i>Hidrología</i>	125

6.2. Modelo de susceptibilidad a movimientos en masa tipo deslizamientos	130
7. Diagnóstico de las viviendas, factor social y estimación de la vulnerabilidad semicuantitativa	133
7.1. Conceptualización y métodos de evaluación	133
7.2. Vulnerabilidad físico-social de las viviendas del barrio bariloche ii etapa.	136
7.3. Análisis de resultados y la zonificación de la vulnerabilidad físico-social.	139
8. Exploración geotécnica y modelo geológico - geotécnico	140
8.1. Esquemas y perfil geológico indicativo y geológico-geofísico local.	141
9. Conclusiones	146
referencia Bibliográfica	150

### **Listado de tablas**

Tabla 1. Etapas y temporalidad (en semanas=Sem.) de actividades ejecutadas en el desarrollo de esta tesis de aplicación. ....	33
Tabla 2. Datos de fallas geológicas evidenciadas superficialmente en campo. ....	64
Tabla 3. Datos estructurales de sistemas de diaclasas tomados en campo.....	68
Tabla 4. Factores multiplicadores para ponderación del factor contribuyente meteorización en el cálculo de la susceptibilidad por el componente geológico. ....	118
Tabla 5. Factores multiplicadores para ponderación del factor contribuyente meteorización en el cálculo de la susceptibilidad por el componente geológico. ....	118
Tabla 6. Ponderación definitiva de la susceptibilidad por el componente geológico. ....	119
Tabla 7. Ponderación definitiva de la susceptibilidad acorde a la pendiente del terreno.....	119
Tabla 8. Ponderación definitiva de la susceptibilidad por el factor geomorfológico.....	120
Tabla 9. Ponderación definitiva de la susceptibilidad por el factor de coberturas y ocupación del suelo. ....	120
Tabla 10. Factores multiplicadores para ponderación del factor contribuyente granulometría en el cálculo de la susceptibilidad por el componente de UGI.....	121
Tabla 11. Factores multiplicadores para ponderación del factor contribuyente selección en el cálculo de la susceptibilidad por el componente de UGI.....	121
Tabla 12. Factores multiplicadores para ponderación del factor contribuyente consistencia-dureza en el cálculo de la susceptibilidad por el componente de UGI.....	122
Tabla 13. Factores multiplicadores para ponderación del factor contribuyente densidad relativa en el cálculo de la susceptibilidad por el componente de UGI .....	122

Tabla 14. Factores multiplicadores para ponderación del factor contribuyente fracturación en el cálculo de la susceptibilidad por el componente de UGI.....	123
Tabla 15. Ponderación definitiva de la susceptibilidad por el factor de UGI .....	124
Tabla 16. Factores multiplicadores para ponderación del factor contribuyente fracturación en el cálculo de la susceptibilidad por el componente de UGI.....	125
Tabla 17. Factores multiplicadores para ponderación del factor contribuyente fracturación en el cálculo de la susceptibilidad por el componente de UGI.....	125
Tabla 18. Factores multiplicadores para ponderación del factor contribuyente fracturación en el cálculo de la susceptibilidad por el componente de UGI.....	126
Tabla 19. Parámetros modelo de susceptibilidad multicriterio de movimientos en masa .....	130
Tabla 20. Ponderación de los criterios de susceptibilidad a movimientos en masa tipo deslizamiento.....	132

### **Listado de figuras**

Figuras 1 y 2. Ubicación de la zona de estudio: izquierda vista en planta del cerro; derecha, área urbana evaluada (dentro del recuadro rojo), del municipio de Piedecuesta. ....	35
Figura 3. Panorámica de la zona de la acumulación detrítica y los daños menores sobre la manzana L, del barrio Bariloche II, impactada el 17 de febrero del año 2013. ....	37
Figuras 4, 5, 6 y 7. Aspectos de las inestabilidades de ladera y los daños generados en las viviendas (madrugada del 17 de febrero del año 2013), en la zona noroccidental del barrio Bariloche II.....	37
Figura 8. Mapa del evento geomorfológico, detonado por lluvias intensas y de corta duración. Se muestran las dos tipologías de movimientos en masa, los recorridos, áreas de acumulación y los efectos negativos en el patrimonio (impacto ambiental en bienes, especialmente viviendas y sus dotaciones), con las alturas alcanzadas (huellas de crecidas o flujos), en tres manzanas y 13 casas del barrio Bariloche. ....	38
Figuras 9, 10, 11 y 12. Acciones de remoción de materiales deslizados, mediante herramientas manuales y mingas comunitarias en el barrio Bariloche II. Abajo la maquinaria prestada por un empresario vecino. ....	42
Figuras 13. Acciones de descargue de la pata del sector desestabilizado. Se nota la retroexcavadora actuando, con la seguridad de la policía nacional. ....	43
Figuras 14 y 15. Imágenes con el inicio del desplate de las obras de drenaje superficial, adyacentes a los dos tanques de la PDS. A la izquierda la armadura para las columnas del encerramiento y, en ambas fotografías, se detalla el nuevo canal perimetral, con el cual se manejarían las aguas de rebose de éstos. ....	44

Figura 16. Obras de empedradización en el talud del Bariloche II etapa. Se observa un amplio sector sin vegetación en donde se aplicaron tramos de guadua anclada con escasos estolones de pasto vetiver. Arriba, a la izquierda, hay riego puntual con abono orgánico.....	45
Figura 17 y Figura 18. Estado de deterioro de los trinchos en guadua aplicados sobre los taludes del terraceo efectuado, desde el 2015: izquierda, con segmento intermedio destruido y ahora sin vegetación, erodado; derecha, detalle de las guaduas podridas. Fecha de registro: 2019-05-25. .....	46
Figura 19. Mapa litotectónico estructural del norte de Suramérica. ....	48
Figura 20. Localización del Cerro la Cantera (en el círculo amarillo) y las principales geoformas y fallas geológicas asociadas. B: Bucaramanga, MR: Mesa de Ruitoque, MS: Mesa de los Santos, ZT: Zapatoca, PB: Páramo de Berlín. ....	49
Figura 21 y Figura 22. Mapa de Amenaza Sísmica NSR-10 (izquierda) y Mapa de Zonificación de la Intensidad Sísmica Esperada (derecha). ....	51
Figura 23. Ubicación del área de estudio (dentro del polígono rojo) sobre el mapa geológico, a escala 1:25.000, elaborado en la microzonificación sismogeotécnica indicativa del AMB. ...	52
Figura 24. Formación Jordán (Jj), observada al sur de la zona de estudio: intercalaciones de areniscas en capas medias con lodolitas, blandas y erodables. Las capas buzcan 20° al NE, hacia la derecha. ....	53
Figura 25. Base de la Formación Jordán dentro de la zona de estudio: limolitas de grano grueso con arenas finas y matriz arcillosa violácea, detrás del comedor comunal. Los dos marcadores indican el inicio de un horizonte incipiente de suelo residual (saprolito fino), desarrollado encima de la roca.....	53

- Figura 26. Detalle de la unidad sedimentaria rocosa Jj, sector friable: limos arcillosos, cuya variación granulométrica y de humectación-secado facilitan la meteorización mecánica. Punto de toma: contiguo a la manzana N del barrio Bariloche II, sector norte..... 54
- Figura 27. Detalle de la unidad Jj, en su expresión lodosa. Note, en la zona superior y desde la libreta (a la izquierda, como escala), el inicio de la unidad de remoción en masa (Qdt), con líticos angulares..... 55
- Figura 28. Capas masivas de areniscas de la unidad Jg, con alto grado de fracturamiento, sobre la vía Bariloche II al Cerro Virgen de La Canterera). La brújula geológica se apoya sobre la estratificación. .... 57
- Figura 29. Formación Girón (Jg) expuesta en los cortes al norte de la zona de estudio: en la base areniscas cementadas, en bancos que varían transicionalmente (desde la parte media de la fotografía) a limolitas violáceas, en capas más delgadas, notadas bajo el morral. Vía hacia la cantera, a la derecha. .... 58
- Figura 30. Panorámica de una parte de la unidad identificada como Depósito Coluvial Antiguo (Qca), en terrenos de la finca la Canterera. .... 59
- Figura 31. Depósito Coluvial Antiguo (Qca), integrado por bloques rocosos de arenitas y conglomerados, duros, dentro de una matriz granular a fina, anaranjada. La persona señala al norte; el barrio Bariloche se observa en la parte superior. .... 59
- Figura 32. Depósito Coluvial Antiguo (Qca), sujeto a erosión hídrica, suprayaciendo discordantemente a la Formación Girón (Jg). Imagen tomada desde la vía al Cerro de la Canterera. Al tope dos personas de escala. .... 60

Figuras 33 y 34. Depósito Coluvial Reciente evidenciado por bloques rocosos con presencia de materiales de tamaños de guijos y guijarros, estación geológica 18(izquierda) y 11 (derecha). .....	61
Figura 35. Depósito Coluvial Reciente (Qcr): vista a la zona desestabilizada en el año 2013, con un gran bloque rocoso (persona para sobre el), ubicada al sur sobre la berma 1. ....	61
Figura 36. Depósito de taludes y bermas (Qdt): material areno-lodoso rojo-amarillento, reconformado en el nivel inferior de la ladera terrazada. Se destaca dos bloques conglomeráticos (debajo del morral). ....	62
Figura 37. Depósitos de llenos antrópicos (Qllen), con escombros y restos de plásticos envueltos en matriz areno-gravosa. Ubicación: frente de la manzana O del Barrio Bariloche II. ....	63
Figura 38. Formación Jordán (Jj) con la presencia de una superficie de falla que evidencia un desplazamiento de esta unidad localizada en la berma 2. ....	65
Figura 39. Roca vs Suelo ubicada en el costado W y acceso al vivero en vía al Cerro la Cantera. Se presenta depósito coluvial antiguo (Qca) y Formación Girón (Jg) fallada a la derecha. Toma del 13 de junio de 2019. ....	65
Figura 40. Detalle del plano (bajo la brújula) de discontinuidad estructural secundario, asociado a una falla de tipo normal. El punto se observa a la izquierda de la fotografía anterior. ....	66
Figura 41. Roca vs Suelo, se observa el tope de la berma 1 y un contacto fallado entre la unidad cartografiada como Deposito de Talud (Qdt) y Formación Jordán (Jj). Imagen de 7 de abril de 2019. ....	66
Figura 42. Proyeccion estereografica de los datos de fallas geológicas. ....	67
Figura 43. Representación estereográfica de los datos estructurales de discontinuidades primarias (Estratificación) y secundarias (Diaclasas). ....	69

Figura 44. Sistema irregular de diaclasas en el que se muestran su orientación y ángulos aleatorios. No obstante, son dominantes las dos diaclasas conjugadas, romboédricas, observadas a la derecha.....	70
Figura 45. Sistema ortogonal de diaclasas en el que se muestra la orientación de la estratificación (buzante hacia la derecha), con ángulos perpendiculares entre sí.....	70
Figura 46. Formación Jordán (Jj) muy fracturada, contigua a la manzana N del barrio Bariloche II, sector norte.....	72
Figura 47. Formación Jordán (Jj) afectada por sistemas de fracturación dominantes (más largos) y subordinados (irregulares y poco extensos). Se observaron hasta tres familias de diaclasas ortogonales a romboédricas. Abajo se notan unos nódulos caoliníticos, cuyo diámetro centimétrico se compara con una moneda de 200 COP.....	73
Figura 48. UGI de rocas sedimentarias tectonizadas (Rstet) de la Formación Jordán (Jj) detrás de la cancha del barrio Bariloche II. Fecha toma: 7 de abril de 2019.....	73
Figura 49. Sector con sistemas de fracturación que caracterizan la unidad Rstet, en la vía al Cerro de la Cantera. El marcador se apoya en la superficie de estratificación (E), mientras que su tapa roja toca una de diaclasamiento principal (D1). Formación Girón (Jg).....	74
Figura 50. Formación Jordán (Jj) con laminación ubicada detrás del comedor comunal al occidente del barrio Bariloche II. Estas discontinuidades son desfavorables geotécnicamente. Toma del 23 de mayo de 2019.....	75
Figura 51. Aspecto del suelo traslocado antiguo (Strca), registrado en el vivero ecológico el edén, al norte de la vía que conduce hacia el Cerro de la Cantera. Foto tomada el 6/Julio/2019.....	76

- Figura 52. Dimensiones y materiales heterogéneos expuestos en cárcava, con gran presencia de guijos dominantes y guijarros angulares, en matriz poco cohesiva anaranjada. Estos son susceptibles a la erosión y contribuyen a la inestabilidad por movimientos en masa ladera abajo.  
..... 77
- Figura 53. Depósito coluvial reciente (Qcr) observado en la vía norte hacia el Cerro la Cantera, antes de los tanques de agua. Foto tomada en 20/Abril/2019 y suelos traslocados denudados en la parte alta, foto tomada el 13/Junio/2019. .... 78
- Figura 54. Escarpe principal que corresponde al borde de la UGI llamada Strcc; ella limita al norte con de la unidad geomorfológica Laderas cóncavas (Dlc). Foto tomada en 01/Junio/2019.  
..... 78
- Figura 55. UGI de suelo de hábitats urbanos (Shaur) con llenos antrópicos y material removido, dispuesto en el talud más inferior. Toma: 25/Mayo/2019..... 79
- Figura 56. Mapa de Unidades Geológicas para Ingeniería (UGI) de la zona de estudio. .... 80
- Figura 57. Unidades Geomorfológicas definidas jerárquicamente en la zona de estudio..... 84
- Figura 58. Unidad Geomorfológica Cerro la Cantera, flanco norte. Toma al occidente desde las canchas del barrio Bariloche II..... 84
- Figura 59. Vista hacia el sur, del costado norte, de la subunidad ladera antropizada (terraceada a tres niveles). El vehículo está sobre la berma más inferior, la persona sobre la intermedia; a la izquierda está la manzana P. .... 85
- Figura 60. Base del talud terraceada al costado norte con una vista hacia el sur..... 85
- Figura 61. Imagen en planta de la denominada Unidad Geomorfológica Cerro de la Cantera. Se eleva en el borde occidental urbano, a partir de los 1000 msnm, con una geometría elipsoidal irregular, de tope redondeado y laderas semiconvexas a cóncavas, muy intervenidas por el

urbanismo. La zona de estudio está delimitada por las vías en color blanco: al centro-norte de acceso al tope del cerro, la cual pasa por los dos tanques del acueducto, y a la derecha entre las calles 2 y 6. Las sombras, de tonos grises más oscuros y mayores pendientes, se correlacionan con los sistemas de fallas reconocidos. ....	86
Figura 62. Rangos de pendientes o gradientes usados, con su cualificación. ....	87
Figura 63. Mapa de pendientes local generado en SIG, coloreado según los anteriores rangos y su denominación.....	88
Figura 64. Vistas cenitales que detallan la variación vial hacia sobre la base de la ladera, en sentido sur, contiguas al actual vivero. La acometida sobre el cerro se calcula de 190 metros de acuerdo a las imágenes multitemporales de dominio público, disponibles en Google Earth. .	89
Figura 65. Vista del terracedo efectuado para la estabilización de un sector la ladera oriental del área de estudio, cortados durante el año 2014.....	90
Figura 66. Estado actual de la parte central de la berma más alta (nivel 3) del sector terracedo por los movimientos en masa del 2013. Aún se requiere manejar y mitigar los procesos erosivos. ....	90
Figura 67. Vista al norte desde la berma de la terraza inferior, frente al costado occidental de las manzanas, y de los taludes de las terrazas 2 y 3. ....	91
Figura 68. Zonificación de unidades geomorfológicas locales (ver en anexos el Mapa 4). ...	92
Figura 69. Unidades relacionadas al urbanismo, manzanas N, O y L, de izquierda a derecha, en la base de la ladera excavada del cerro estudiado. ....	93
Figura 70. Casa esquinera de la manzana N ubicada a pocos metros de la base de la ladera de excavada del cerro de estudio. ....	93

Figura 71. Panorámica desde la vía de acceso por el norte al Cerro de la Cantera. Se observan las subunidades de laderas peniplanizadas (Dlp), contiguas a los dos tanques (subunidad Taa) del acueducto.....	94
Figura 72. Drenaje sobre canaleta ubicado en la esquina suroriental de la zona de estudio sobre la berma 1 terrazada. ....	95
Figura 73. Sector contiguo a la foto anterior, al sur de la zona desestabilizada (vegetada al centro e izquierda) en febrero de 2013. Nótese el primer nivel de la terraza y el flujo de agua en la cuneta interna. ....	95
Figura 74. Laderas peniplanizadas en las que se observan cultivos de piña sembrados posteriormente al evento del 2013 en el sector SW del Cerro la Cantera. Fecha de imagen: 25/Julio/2014.....	96
Figura 75. Vista hacia el Cerro la Cantera (con virgen al fondo) de laderas onduladas y erodadas (excavadas en este caso). Fecha de toma: 20/Abril/2019. ....	96
Figura 76. Vista al noroccidente del elemento morfológico laderas cóncavas (Dlc).....	97
Figura 77. Berma 3 con vista hacia el norte.....	97
Figura 78. Vista hacia el sur, berma 3.....	98
Figura 79. Tope de las bermas. ....	98
Figura 80. Areniscas de la Formación Girón, dentro de la geoforma de origen estructural, de rocas tectonizadas (Ert). ....	99
Figura 81. Mapa de hidrología local de la zona de estudio.....	100
Figura 82. Arriba cuneta y dissipador al frente. Costado sur, detrás de la caseta comunal. Foto tomada el 1/Junio/2019. ....	101

Figura 83 y Figura 84. Cuneta derruida (sin bordillos), con flujo hacia la persona, al sur (imagen izquierda) y detalle de la misma cuneta, en su inicio canalizado, vista hacia el NW (imagen derecha). Foto tomada en 01/Junio/2019. ....	101
Figura 85. Berma superior vegetada, en la que se indica la salida del drenaje q viene desde los tanques.....	102
Figura 86. Empozamiento de aguas (o zona húmeda) en la cuneta de la berma, cerca al sitio de foto anterior. Foto tomada en 25/Mayo/2019. ....	102
Figura 87. Drenaje natural, con flujos de aguas estacional (intermitente) presente hacia la cabecera del escarpe formado por el evento de 2013 ubicado al nororiente de la zona de estudio. ....	103
Figura 88. Surcos en el extremo norte, con flujo libre de aguas drenadas sobre el talud terracedo. Foto tomada en 25/Mayo/2019.....	103
Figura 89. Rocas de la Formación Girón (Jg), cuyas discontinuidades facilitan la infiltración y el flujo superficial laminar. Foto tomada en 07/Abril/2019.....	104
Figura 90. Drenaje efímero presente en cárcava aguas abajo a aproximadamente 80mts presente al suroriente de los tanques de agua ubicados en el Cerro La Cantera actuando como un canal natural para el escurrimiento de aguas. ....	104
Figura 91. Drenaje efímero presente en bifurcación de cárcava aguas abajo a aproximadamente 80mts al suroriente de los tanques de agua ubicados en el Cerro La Cantera, actuando como canal natural. ....	105
Figura 92. Humedad en zócalos en la casa 12 de la manzana L en el barrio Bariloche II. Imagen tomada en 29/Mayo/2019.....	105

Figura 93. Humedades presentes en el muro de la base del talud, a la derecha de la casa 10 en la manzana L del barrio Bariloche II. Foto tomada en 07/Abril/2019. ....	106
Figura 94. Detalle de la zona con goteos de aguas, en la pata del muro, cerca de la libreta (al centro). Foto tomada en 23/Mayo/2019. ....	106
Figura 95. Mampostería de escaleras y confinamiento de zonas verdes, deterioradas por la humedad y falta de mantenimiento. Foto tomada el 25 de mayo de 2019. ....	107
Figura 96. Humedades en el zócalo de la casa 7 en la Manzana O del barrio Bariloche II. Foto tomada en 01/Junio/2019. ....	107
Figura 97. Sector denudado, con procesos de erosión pluvial y principalmente hídrica, dentro de la unidad geomorfológica Dlo. A varias decenas de metros al suroccidente de la zona de estudio, costado oriental de la vía al monumento a la Virgen de la Cantera (vista en el centro, al fondo). ....	110
Figura 98. Un aspecto del rastrojo alto, la unidad verde más predominantemente localmente, que puede ser disperso a denso. Esta vegetación es importante porque cubre a la zona de coluviones, de la acción de la lluvia y la erosión. Posee arbustos bajos, helechos y otras especies. ....	111
Figura 99. Bosque secundario bien conservado, al extremo sur de la zona de estudio. Contiguo a la cancha suroccidental de la etapa II del barrio Bariloche. ....	111
Figura 100. Pastos rastrojos y altos, vistos en el comedor comunal. Toma del costado suroriental. ....	112
Figura 101. Pastos altos, plantados y con densidad, siendo efectivos para la protección y estabilidad de suelos. Varios de los trinchos en bambú, instalados en tramos horizontales, luego se establecieron y desarrollaron como plantas (subfamilia poáceas), arriba izquierda. ....	112
Figura 102. Vivero ecológico Belén. ....	113

Figura 103 y Figura 104. Izquierda, Zonas Verdes contigua a la manzana P, plantada con cultivos de pan coger; derecha, posee matarratón, cítricos y ornamentales.....	114
Figura 105. Mapa de coberturas vegetales y usos del suelo. ....	115
Figura 106 y 107. Modelo de susceptibilidad acorde a la ponderación de los respectivos factores contribuyentes para los componentes geológico (arriba) y de pendientes (abajo).....	127
Figura 108 y 109. Modelo de susceptibilidad acorde a la ponderación de los respectivos factores contribuyentes para los componentes geomorfológico (arriba) y de coberturas y usos del suelo (abajo). ....	128
Figura 110 y 111. Modelo de susceptibilidad acorde a la ponderación de los respectivos factores contribuyentes para los componentes de unidades geológicas para ingeniería UGI (arriba) e hidráulico (abajo). ....	129
Figura 112. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa, tipo deslizamiento, del barrio Bariloche etapa II de tesis de pregrado. ....	131
Figura 113. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa, tipo deslizamiento, del barrio Bariloche etapa II. ....	132
Figura 114. Formato de Diagnostico del Estado de las Viviendas. ....	135
Figura 115 y 116. Vivienda con tres pisos y dos ubicadas en la zona de estudio.....	137
Figura 117 y 118. Casas con cubierta metálica y tejas de zinc .....	137
Figura 119 y 120. Fisuras presentes en pisos y vigas. ....	138
Figura 121. Humedades en fachadas y muros de las viviendas examinadas .....	138
Figura 122. Localización de estudios geofísicos y geotécnicos realizados en el talud aldaño al barrio Bariloche II etapa.....	140

Figura 123. Ubicación de la línea de refracción sísmica LS1 realizada por el autor en talud ubicado en el Barrio Bariloche II del municipio de Piedecuesta, departamento de Santander. .....	141
Figura 124. Corte geológico previo, elaborado en una tesis de pregrado en geología de la UIS.....	142
Figura 125. Modelo Geológico-Geofísico (sobre imagen tomográfica EM), propuesto en la ladera occidental del barrio Bariloche II etapa. Nótese la disposición de la Formación Jordán (Jj), el Grupo Girón (Jg) y el coluvión antiguo (Qca) dentro de un importante sistema de fallas inverso, con fallamiento normal relacionado. ....	143
Figura 126. Resultado del ensayo de refracción sísmica, para el modelo de la tomografía 2D: son definidas tres zonas, explícitas dentro de los párrafos respectivos.....	144
Figura 127. Resultado del ensayo de refracción sísmica, para el modelo de la tomografía 2D: son definidas tres zonas, explícitas dentro de los párrafos respectivos.....	145

## Introducción

La presente tesis aplicada para optar al título de magister en geotecnia de la Universidad Industrial de Santander (UIS) busca consolidar y profundizar en la base del conocimiento del riesgo de un sector de ladera del barrio Bariloche II etapa, fundado en la base de las estribaciones del Cerro de la Cantera, al noroccidente urbano del municipio de Piedecuesta (Santander).

Como antecedentes están los fenómenos de inestabilidad ocurridos en febrero de 2013, los incendios forestales de inicios del 2018, y los deslizamientos de diciembre de 2018 y enero de 2019; también, la zona se encuentre catalogada con amenaza alta por avalancha de lodo y piedra, según el POT de Piedecuesta. También, debido a los impactos negativos del primer evento citado las instituciones locales y metropolitanas efectuaron estudios y obras de ingeniería, buscando la reducción del riesgo, que ha sido inadecuada.

En consideración a lo anterior, este trabajo avanzó en la realización del ortofotomosaico detallado, la identificación y zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:600, por métodos determinísticos y heurísticos combinados, incluye modelación con SIG y programas computacionales, la comparación con los modelos previos y el análisis de vulnerabilidad físico-social de las viviendas más cercanas, mejorando la información previa y a escala detallada.

## **Listado de Apéndices**

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

Apéndice A. Inventario de procesos morfodinámicos locales, y análisis multitemporal con imágenes de sensores remotos de los cambios de uso del suelo y dinámica de los procesos de inestabilidad, cobertura, y uso del suelo.

Apéndice B. Descripción general de la exploración geotécnica y geofísica realizada en el sector de estudio

Apéndice C. Comparativo entre el análisis de estabilidad realizado por amb (2016), jaimes (2016), y un análisis utilizando el perfil geológico – geotécnico propuesto en la presente tesis

Apéndice D. Planos

## Resumen

**Título:** Zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa y análisis de vulnerabilidad física, de viviendas y su exposición, en el costado occidental del barrio Bariloche etapa II – Piedecuesta\*

**Autor:** John Jairo Báez Lizarazo\*\*

**Palabras Clave:** Susceptibilidad, Piedecuesta, Bariloche, Estabilidad

### Descripción:

La susceptibilidad por movimientos en masa constituye una herramienta de predictibilidad espacial para indicar un potencial de ocurrencia de eventos de remoción en masa. En el Barrio Bariloche II del municipio de Piedecuesta, se han presentado históricamente movimientos en masa del tipo deslizamiento, ocasionando emergencias como la del evento de febrero de 2013.

Se realizó una caracterización de seis variables geoambientales para llevar a cabo un análisis de susceptibilidad a movimientos en masa tipo deslizamiento utilizando herramientas de sistemas de información geográfica. Las variables caracterizadas fueron: unidades geológicas locales, unidades y atributos geomorfológicos, morfometría, caracterización básica de la escorrentía local e hidrología superficial, cobertura y ocupación del suelo, y unidades geológicas para ingeniería. Estas variables se caracterizaron a través de una calificación heurística sustentada en reconocimientos de campo, sensores remotos, y entrevistas con habitantes del sector. El inventario de procesos morfodinámicos permite validar los resultados del modelo de susceptibilidad.

Considerando toda la información nueva para la caracterización de las variables geoambientales y la exploración geotécnica disponible del sector se propone un perfil geológico – geotécnico distinto al considerado en documentos anteriores, y se realiza un análisis de estabilidad de comparación. Finalmente, se realizó una calificación de la vulnerabilidad físico-social de las viviendas contiguas al sector más inestable con base en una inspección visual y una metodología propia.

---

\*Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Germán Reyes Mendoza, Geólogo. Codirector: Wilfredo del Toro Rodríguez, Ingeniero Civil.

## Abstract

**Title:** Susceptibility zoning due to mass movements and analysis of physical vulnerability, of houses and their exposure, on the western side of Bariloche Stage II district - Piedecuesta\*

**Author:** John Jairo Báez Lizarazo\*\*

**Keywords:** Susceptibility, Piedecuesta, Bariloche, Stability

### **Description:**

Mass movement susceptibility constitutes a spatial predictability tool to indicate a potential for occurrence of mass wasting event. In the Bariloche II district from Municipality of Piedecuesta, mass wasting events of the landslide type have historically occurred, causing emergencies such as February 2013 event.

A characterization of six geoenvironmental was carry out to do a mass wasting of landslide type susceptibility analysis using geographic information system tools. The variables were: local geological units, geomorphological units and attributes, morphometry, basic characterization of local runoff and shallow hidrology, land cover and land occupation, and geological units to civil engineering. These variables were characterized though a heuristic calification based of field visits, remote sensor, and interviews with neighbors. The morfodinamic processes inventory allow to validate the results of the susceptibility model.

Considering all the new information for the characterization of the geoenvironmental variables and the available geotechnical exploration for this sector, a different geological-geotechnical profile is proposed and a comparison analysis stability is carried out. Finally, a classification of the physical-social vulnerability of the house adjacent to the most unstable sector was made based on a visual inspection and a own methodology.

---

\*Degree Thesis

\*\* Physical-Mechanical Engineering Faculty. Civil Engineering. Director: Germán Reyes Mendoza, Geologist. Codirector: Wilfredo del Toro Rodríguez, Civil Engineer.

## 1. Objetivos

### 1.1. General

Realizar la caracterización geoambiental local, la zonificación y evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa del tipo deslizamiento y un diagnóstico de vulnerabilidad física a escala detallada de un área contigua al Cerro de la Cantera, al occidente del barrio Bariloche etapa II de Piedecuesta.

### 1.2. Objetivos específicos

- Reconstruir el evento de inestabilidad de febrero de 2013, usando testimonios de la comunidad, fotos-videos, registros noticiosos y generar un mapa morfológico forense, con las tipologías ocurridas, huellas de impacto, geometría y vectores cinemáticos.
- Caracterizar seis componentes geoambientales (unidades geológicas locales, unidades y atributos geomorfológicos, morfometría, caracterización básica de la escorrentía local e hidrología superficial, cobertura y ocupación del suelo, y unidades geológicas para ingeniería) utilizando imágenes de sensores de remotos de distintos años y métodos de evaluación heurística apoyada en sistemas de información geográfica.
- Llevar a cabo una revisión de la evaluación geotécnica, basada en sondeos de campo y ensayos preexistentes de laboratorio de propiedades básicas (granulometría, límites, humedad natural y clasificación de suelos) y mecánicas (capacidad portante, resistencia, cohesión y ángulo de fricción interna).
- Evaluar la estabilidad del talud y la amenaza determinística, usando el programa *Slide*, usando la teoría de equilibrio límite, por varios métodos y condiciones de análisis, para definir el comportamiento estático y dinámico del terreno y los factores de seguridad.

- Identificar, describir y dar peso a los factores contribuyentes, intrínsecos y extrínsecos, para determinar heurísticamente la susceptibilidad local a procesos morfodinámicos y cartografiarla acorde al modelado multitemático de factores condicionantes y detonantes, aplicando álgebra de mapas en ArcGIS.
- Caracterizar la vulnerabilidad física de las viviendas dentro del área de estudio, aplicando la metodología DEV ajustada.

## 2. Generalidades y objeto de estudio

### 2.1. Planteamiento del Problema de Investigación

En el noroccidente del área urbana del municipio de Piedecuesta se han presentado diversos movimientos en masa relacionados al urbanismo para la construcción viviendas (e infraestructuras y equipamientos, como vías, redes de energía, alcantarillado, acueducto, canchas, caseta comunal, etc.), sobre la base de las laderas del Cerro de la Cantera. Estos procesos exógenos, cada vez más comunes en nuestro planeta ante el cambio, son producto de la interacción de factores internos y externos, que se han registrado allí con severidad en los últimos diez años, afectando a cerca de 60 viviendas del barrio Bariloche II etapa y que, especialmente, generan riesgo tanto a sus residentes.

A pesar de la realización de estudios técnicos y de obras de control estructural subsiguientes, *post mortem* e incompletas, dichos procesos siguen latentes debido a las variaciones en el estado del tiempo (destacando la lluvia), variabilidad y climático, combinados con las condiciones geológicas, geomorfológicas, hidrogeológicas, geotécnicas locales y la sismo tectónica activa, que dan susceptibilidad y desestabilizan a las laderas, taludes de corte y los terraceos ejecutados.

Las acciones humanas en dominios metropolitanos ignoran las restricciones en la oferta de los entornos naturales y el ordenamiento territorial: hay conflictos ambientales, desmedido uso del suelo ante la explosión demográfica proliferante (según la ONU, desde el 2003, el crecimiento de la población mundial urbana es el 50% del total. Heiken et al., 2003; en Hermelín, 2007); y el propio urbanismo extensivo e intensivo, que ha conllevado a desarrollos en altura ante la demanda de vivienda urbana, traen asociadas serias vulnerabilidades sociales y físicas al problema. Se suman aquí la falta de conciencia civil, de educación ambiental, de aplicar reglas y normas, y el control y seguimiento interinstitucional.

También, los extensos incendios forestales presentados a inicios del 2018 contribuyeron a que esta zona se catalogara con amenaza alta por avalancha de lodo y piedra, según los estudios de la UIS incorporados en el POT de Piedecuesta (2001).

Todo esto evidencia la necesidad de un estudio puntual y actual, que contribuya al conocimiento y al manejo del problema, que puede llegar a considerables pérdidas, tanto humanas como materiales; esto es, se debe trabajar en el conocimiento y la gestión del riesgo de desastres.

El presente trabajo de investigación busca consolidar y profundizar los estudios básicos de susceptibilidad, amenaza y vulnerabilidad para las gestiones del riesgo de una zona afectada por fenómenos naturales. Para ello se integran diferentes métodos y herramientas, información bibliográfica recopilada y evaluada, con datos primarios de campo, cartografía multitemática de atributos geológicos, geomorfológicos, hidrográficos, climáticos y bióticos básicos (referido a coberturas vegetales y usos del suelo) estructurados con GDB y en ambiente SIG (ArcGIS versión 10.3), junto a exploraciones geofísicas y ensayos de laboratorio geotécnicos. Ello para identificar los factores contribuyentes y entender sus interrelaciones, con los agentes detonantes o de disparo de los procesos morfodinámicos, bajo la presión humana de los hábitats metropolitanos *in crescendo*, y así obtener una zonificación de amenaza más integral y detallada que las antecedentes, junto a la recomendación a nivel básico de las medidas de control y mitigación estructural.

## 2.2. Justificación y Normativa

En la última década se han presentado eventos que produjeron daños en las viviendas aledañas, por fortuna sin muertes de personas, pero con serias pérdidas en bienes y el medio ambiente. Al noroccidente del área urbana del municipio de Piedecuesta, en la base de las laderas del Cerro de la Cantera, la época invernal de inicios de 2013 activó movimientos en masa que afectaron “a 60 familias de las manzanas O, L y N del sector II de Bariloche y dejaron sepultadas a seis viviendas, con toneladas de material transportado; la avalancha de lodo logró alcanzar hasta 3 metros de altura. Este acontecimiento generó la evacuación de las familias de manera inmediata” (adaptado de: Vanguardia.com, 2013a). Como solución de mitigación se realizaron trabajos de terraceo del talud para su estabilización, los cuales fueron realizados en forma insuficiente dos años después.

Entre finales del 2018 e inicios del 2019 se incrementó el movimiento en masa, por las lluvias presentadas que reactivaron esta amenaza “poniendo en riesgo de nuevo a 72 viviendas” (Vanguardia.com, 2019b). Otras 600 familias están en riesgo por inminente deslizamiento en los barrios Villas de Andalucía y Brisas de Primavera II, al oriente urbano (Vanguardia.com, 2018a).

El actual conocimiento del riesgo (y sus factores inherentes: la amenaza y la vulnerabilidad) está sustentado en la Ley 1523 de 2012 que adoptó la política nacional y estableció el Sistema Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD): define al desastre como “un proceso social antes que un acontecimiento aislado, y a la gestión del riesgo como el proceso de planificación, regulación y acción permanente para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de los desastres”. También hoy día se les ha exigido a los entes territoriales la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial (POT's), mediante los Decretos 1807 de 2014 y 1077 de 2015.

Y en el panorama global la 3ª Conferencia Mundial de las Naciones Unidas sobre Reducción del Riesgo de Desastres 164 naciones -incluyendo Colombia- adoptaron el Marco de Acción de Sendai para el periodo 2015-2030, siguiendo cuatro prioridades: 1) comprender el riesgo de desastres; 2) fortalecer la gobernanza; 3) intervenir en la reducción del riesgo; y 4) reforzar la preparación para desastres.

### **2.3. Antecedentes y Estudios Previos**

Para el año 2015 fue realizado un informe del barrio Bariloche II etapa por el AMB en una primera fase, donde su objetivo principal era realizar una investigación geotécnica, geológica, topográfica y geomorfológica por medio de trabajos de campo y de laboratorio, con la generación de datos y análisis necesarios para proponer obras geotécnicas y de estabilidad a realizar en dicho barrio (adaptado de: AMB, 2015).

Durante el año 2016 también el AMB llevo a cabo la segunda fase donde su objetivo principal sería el diseño de alternativas de mitigación para la amenaza por remoción en masa en este sector a partir de la información proporcionada en el estudio del AMB (2015) en su primera fase.

Se presentaron entonces tres alternativas o propuestas, las cuales son:

1. Recuperación de las terrazas con construcción de drenes horizontales que además van acompañadas de la construcción de cunetas para recoger las aguas y el revestimiento de los taludes con un manto de larga duración tipo *Pyramat*.

2. Recuperación de las terrazas existentes con excavación de drenes de grava verticales y conectarlos con drenes horizontales a cunetas construidas en el nivel inferior de las terrazas, con además la protección por medio de geo mantos y revegetalización de las zonas donde se generen drenes y no existan terrazas.

3. Construcción de muros de contención en cada una de las terrazas previamente recuperadas y construcción de drenes horizontales con respectivas cunetas, geomantos y empradización de los taludes restantes (AMB y Consorcio Geoingeniería, 2016).

En la tesis de Jaimes (2016) se llevó a cabo una investigación geológica en la zona de estudio, para identificar las condiciones de susceptibilidad a movimientos en masa, aplicando la guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2015), caracterizando la cobertura y uso del suelo, las unidades geológicas para ingeniería o UGI, los elementos geomorfológicos, e incorporando data de exploración básica del subsuelo y de ensayos de laboratorio, además del inventario de movimientos en masa del SIMMA (SGC, 2019a).

#### **2.4. Metodología para la Investigación y Tiempos de Ejecución**

Con el fin de cumplir los objetivos trazados se propusieron y adoptaron los siguientes estadios metodológicos, con sus actividades principales, que consta de seis grupos de etapas sucesivas:

- Etapa I: Preliminares y recopilación de información secundaria.
- Etapa II: Labores de reconocimiento, difusión social e inspecciones de campo.
- Etapa III: Integración de datos de la línea base geoambiental (caracterización de factores contribuyentes).
- Etapa IV: Zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa y caracterización de la vulnerabilidad físico-social semicuantitativa.
- Etapa V: Revisión y análisis de medidas de manejo, control y estabilización propuestas por diferentes entidades y autores.
- Etapa VI: Conclusiones, recomendaciones y edición del libro final.

Las actividades y etapas llevadas a cabo se presentan en el siguiente cronograma de ejecución, organizado en etapas vs tiempo (en trimestres y meses, Tabla 1).

Tales labores se desarrollarán en un plazo de nueve meses:

Tabla 1.

*Etapas y temporalidad (en semanas=Sem.) de actividades ejecutadas en el desarrollo de esta tesis de aplicación.*

Etapas	Trimestre 1				Trimestre 2				Trimestre 3			
	Sem. 1-4	Sem. 5-8	Sem. 9-12	Sem. 13-16	Sem. 17-20	Sem. 21-24	Sem. 25-28	Sem. 29-32	Sem. 33-37	Sem. 38-41	Sem. 42-45	Sem. 46-49
I	X											
II	X	X	X									
III			X	X								
IV			X	X	X	X	X	X	X			
V			X				X	X	X	X		
VI			X				X				X	X

Fuente: Autor.

### 3. Área de estudio, descripción del evento, y atención de la emergencia

En este capítulo se describe el área objeto de estudio y se sintetizan en seguida las condiciones que antecedieron a la emergencia por movimientos de ladera que puso en alerta a las autoridades ambientales de los procesos de inestabilidad en el sector, con las situaciones vividas por sus residentes (fase de crisis), algunas cifras de daños en las viviendas del barrio Bariloche II etapa que ocurrieron principalmente en dos de las tres manzanas (la L con 9 viviendas; en la O con 4 casas; y en la N, con taponamiento de la calle peatonal, y sin dañar bienes), y las acciones inmediatas comunitarias y de mediano a largo plazo (fase de recuperación y rehabilitación) adelantadas por la propia comunidad y las entidades del Estado, que apoyaron la emergencia. Las tipologías de rupturas, con los materiales involucrados y los factores contribuyentes, son objeto de la presente tesis de maestría en geotecnia.

A raíz del evento registrado en febrero del año 2013 la comunidad del barrio Bariloche II etapa del municipio de Piedecuesta efectuó gestiones de control y reducción del riesgo, que se describen con la finalidad de obtener una visión global de las intervenciones administrativas y técnicas, sobre todo de carácter ingenieril, ante estas entidades: Gobernación de Santander, AMB, Piedecuestana de Servicios Públicos (PDS), Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), entre otras.

#### 3.1. Breve Historia, Ubicación y Extensión de la Zona de Estudio

Piedecuesta, la ciudad 'hidalga', fue fundada el 26 de julio de 1776; es una de las poblaciones que integran el Área Metropolitana de Bucaramanga - AMB, como gran centro urbano o núcleo principal (adaptado de: Reyes y Álvarez, 2007).

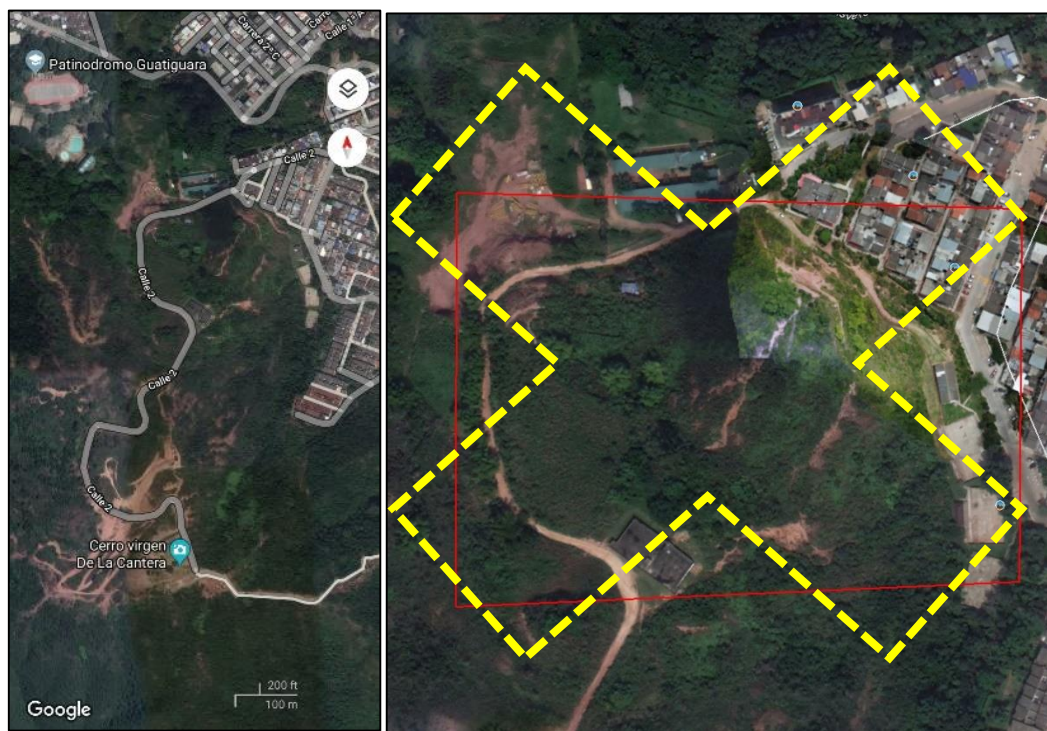
El barrio Bariloche está ubicado en Piedecuesta, noroccidente del área urbana (Figura 1). La zona escogida para la edificación de las viviendas estaba llena de cañaduzales: fueron erigidas por la constructora Hernández Gómez HG LTDA., a finales del año 1993 y terminando en enero de

1994, cuando llegaron sus primeros ocupantes; y su parroquia inaugurada en 1995 (conversación sostenida con la sra. María Nayibe Fernández, presidente de la Junta de Acción Comunal, líder cívica y fundadora del barrio). Viven cerca de 1.400 residentes.

Todo el barrio, de estrato tres, se levantó a lo largo de la calle 2 y fue construido entre las manzanas A y Q, costado nororiental y en la base del Cerro Virgen de la Cantera. En total son 18 manzanas distribuidas de manera estratégica y comunicadas entre sí por senderos peatonales y áreas verdes (Vanguardia.com, 2019a). La etapa II es de 72 casas, con un promedio de cuatro residentes por vivienda: contiene a las manzanas A, L, M, O, N y P, accediendo por la calle 2B.

La zona a estudiar se distribuye entre  $73^{\circ} 3' 37.23''$  y  $73^{\circ} 3' 28.20''$  longitud occidental y de  $6^{\circ} 59' 13.1''$  a  $6^{\circ} 59' 20.90''$  de latitud norte; posee 4.5 hectáreas (ver polígono rojo en Figura 2).

*Figuras 1 y 2.* Ubicación de la zona de estudio: izquierda vista en planta del cerro; derecha, área urbana evaluada (dentro del recuadro rojo), del municipio de Piedecuesta.



Fuente: Modificado de Google Earth (2018).

El Cerro Virgen de la Cantera, que bordea al occidente y en cuya base se fundó la etapa II, es a su vez limitado al norte y al noroccidente por la vereda Guatigüará, mientras que hacia el sur lo está con la vereda Barro Blanco. Todos estos terrenos han sido modificados por el crecimiento urbano, susceptibles a procesos morfodinámicos y, desde la colonia, fuente de materiales de construcción de viviendas, vías, edificios gubernamentales (v.g. el Palacio Municipal o Casa Consistorial) y de templos parroquiales (como el de la iglesia en piedra de San Francisco Javier, fundada en octubre de 1774, con fontrís, campanarios y muros rojizos), uno de los más antiguos de Santander, hecho con areniscas, muy probablemente explotadas desde la citada cantera.

La base topográfica para toda la cartografía de la presente tesis fue generada considerando esto: primero un levantamiento topográfico superficial elaborado estación Total, con coordenadas de amarre georreferenciadas a un GPS de doble frecuencia, y cuyo dibujo planimétrico-altimétrico se presentó AutoCAD, a escala aproximada 1:500 (AMB y Consorcio Geoingeniería, 2016); toma de aerofotografías con dron y generación de ortofotomosaico detallado del sector norte a noroccidental del cerro en cuestión, con las manzanas más críticas del barrio Bariloche,

### **3.2. Cronología y Mapa del Evento Geomorfológico**

Los procesos de remoción en masa (o movimientos en masa), detonados por lluvias intensas y persistentes, constaron de un primer deslizamiento traslacional de mayor amplitud, proseguido por flujos de lodos. Tales mecanismos de inestabilidad, con la cinemática y la distribución espacial en los terrenos urbanizados, fueron ordenados cronológicamente, integrando información primaria observada en campo (geología superficial, geomorfología cuantitativa y geotecnia forense, con retroanálisis cualitativos) y data disponible en la WEB (noticias, videos), en informes técnicos, tesis de pregrado y sobre todo, basados en las entrevistas personales sostenidas con la población involucrada y sus líderes comunitarios. En la Figuras 3 a 7 se observa un poco de esta tragedia.

*Figuras 4, 5, 6 y 7.* Aspectos de las inestabilidades de ladera y los daños generados en las viviendas (madrugada del 17 de febrero del año 2013), en la zona noroccidental del barrio Bariloche II.



Fuente: Vanguardia.com (2013a); Oriente Noticias Canal TRO (2013).

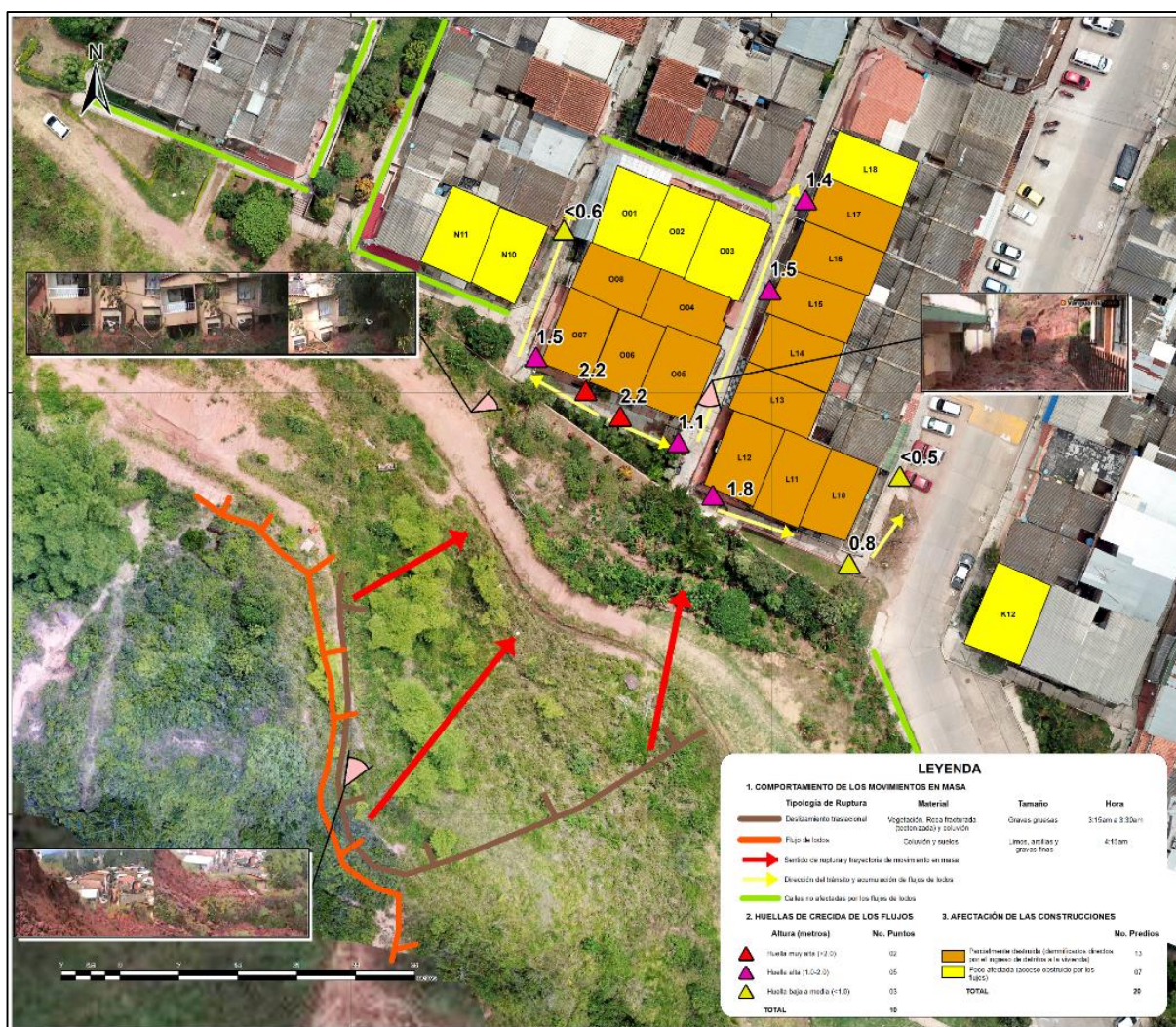
*Figura 3.* Panorámica de la zona de la acumulación detrítica y los daños menores sobre la manzana L, del barrio Bariloche II, impactada el 17 de febrero del año 2013.



Fuente: Oriente Noticias Canal TRO (2013).

La geometría de las rupturas o zonas de despegue, con las trayectorias de desplazamiento (o tránsito) y de acumulación (o parte distal, de las acumulaciones gravo-lodosas), con las direcciones de los flujos y alturas de las huellas (o ‘crecidas’), se presentan en el Mapa 11, mostrado en la Figura 8.

*Figura 8.* Mapa del evento geomorfológico, detonado por lluvias intensas y de corta duración. Se muestran las dos tipologías de movimientos en masa, los recorridos, áreas de acumulación y los efectos negativos en el patrimonio (impacto ambiental en bienes, especialmente viviendas y sus dotaciones), con las alturas alcanzadas (huellas de crecidas o flujos), en tres manzanas y 13 casas del barrio Bariloche.



Fuente: Autor

### 3.3. Fase de Crisis y Manejo de Comunidades

Producto de las lluvias intensas que cayeron sobre Piedecuesta la tarde del sábado (e intensificadas desde las 10:30 pm), éstas se prolongaron hasta la madrugada del día domingo 17 de febrero del año 2013. El valor de las precipitaciones acumuladas ese día, según el IDEAM, alcanzó los 128 mm, y duraron casi 12 horas

Siendo entre las 3:15 y las 3:30 am los terrenos de la esquina noroccidental baja del Cerro Virgen de la Cantera sufrieron la primera remoción en masa: ella se desprendió, como se indica en el mapa, desde la parte alta y contigua sobre la esquina noroccidental del comedor escolar, el cual no se afectó, y se dirigió al oriente rebosando los muros de las zonas verdes, tapando los andenes, antejardines y acumulándose en la parte frontal de las manzanas O y L (casas 5, 6 y 7; casas 10, 11 y 12, respectivamente) del barrio Bariloche II etapa. Esta remoción se tipificó como un deslizamiento integrado por materiales rocosos sólidos y angulares, de la que penetraron incluso en las salas de algunas viviendas, alcanzándose alturas máximas de 1.2 a 2.0 m. Este primer evento geomorfológico alcanzó a fracturar las paredes, las que separan a las salas de las alcobas en las casas 5 y 7 de la manzana O. Cabe señalar que unos momentos antes de este episodio (aproximadamente 5 minutos) un par de residentes notaron un primer escurrimiento de agua con barro, acompañado de ruidos notorios desde la montaña y por ello alertaron a sus vecinos sobre tal situación. Estas aguas lluvias provenían tanto del escurrimiento sobre las laderas saturadas como de las aguas del rebose de los dos tanques del acueducto: por testimonios de los residentes ya se registraban flujos de aguas del acueducto desde la primera semana de enero del 2013, en forma constante, las cuales se acentuaban en las horas de la noche.

Así, sobre las zonas verdes del costado occidental de estas dos manzanas, en la madrugada del día domingo 17 de febrero, se concentraron caudales anormales de aguas lodosas, con olor a barro fuerte. El tránsito de los materiales del primer gran deslizamiento, definido como de tipo

traslacional y en una altura mayor estimada de tres metros, como se evidencia en su escarpe principal (véase Figura 134). Esta primera remoción en masa, con los colapsos y daños asociados, despertaron inmediatamente a todos sus residentes.

Algunos salieron por las puertas, saltando sobre el barro, aunque la mayoría de pobladores más damnificados (con sus casas tapadas en el primer piso) procedieron a evacuar por los techos o los balcones. Todos corrieron hacia la parte de abajo del barrio, retirándose del movimiento en masa, aglutinándose aterrados en la zona de parqueaderos (de acceso vehicular a la cantera) o sobre la avenida principal.

El segundo evento importante se presentó aproximadamente a las 4:30 am, casi una hora después del anterior. Aquí se observaron flujos de lodos, canalizados y sobresaturados, con menor fracción detrítica: su parte media y distal llegaron hasta la manzana L, el sendero peatonal entre las manzanas L y O (afectando a más viviendas, sobre sus costados: las casas 13 a la 17 de la manzana L; y la vivienda 4 de la manzana O, de espaldas al flujo de lodos). En total resultaron 13 viviendas directa y seriamente damnificadas. Esto lo confirma el Sr. Oscar Humberto Cote, en aquel momento integrante de la JAC y residente en la Manzana O (la más impactada negativamente) de la II etapa.

Una vez evacuada la zona, gracias a las características de moderada velocidad, espacio, tiempo, altura y direcciones de movimiento, las remociones integradas por estos dos pulsos, no se registraron pérdidas de vidas humanas, pero sí de cuantiosos bienes muebles (electrodomésticos, juegos de sala-comedor, neveras, lavadoras, estufas, mobiliario e implementos de cocina, de alcobas, vestuario y otros enseres) y daños en inmuebles (puntualmente hubo sería afectación estructural de columnas y muros de carga de viviendas; mampostería y rejas de encerramientos, de antejardines, puertas y ventanas arrasadas, daños en paredes y pisos internos), además de daños

en postes de energía, redes de alcantarillado y la suspensión del servicio de gas por ruptura de contadores. También debe citarse que los reboses de aguas provenientes de los tanques de la PDS ubicados en la parte alta de la ladera continuaron fluyendo sin control durante tres días más. De ello dan constancia los miembros de la JAC del barrio y los videos registrados: entre los días lunes 18 y martes 19 de febrero se observó un caudal continuo e importante desde estos tanques, escurriendo sobre la zona desestabilizada y hasta las manzanas mencionadas.

Es de destacar que no se presentaron oportunamente organismos de socorro y salvamento (vg bomberos voluntarios de Piedecuesta, defensa civil, PONAL, etc.) durante las citadas horas de la madrugada y en la mañana: cuando ellos arribaron fueron rechazados por las comunidades.

Según TRO (2013) fueron evacuadas por la alcaldía dos manzanas y decenas de casas quedaron afectadas por los movimientos de ladera, adyacente al barrio Bariloche II.

En horas de la mañana la misma comunidad se organizó y efectuó las labores de remoción de escombros vegetales, lodos, arenas y fragmentos rocosos, acumulados en los senderos peatonales y luego en las viviendas, tal y como se evidencia en las Figuras 9 a 12. Primero se usaron herramientas manuales para la remoción y limpieza (con carretillas, palas, escobas, traperos, cajas de plástico para sacar tierra, y otros implementos); posteriormente fueron apoyados, desde las 10 am, por un minicargador y dos volquetas. Fueron aproximadamente 120 horas de maquinaria, para la remoción casi total de los materiales deslizados, el cual fue retirado y dispuesto. Cabe señalar que no se hizo limpieza del alcantarillado sanitario. El Sr. Ángel de Jesús Becerra Ayala, alcalde de Piedecuesta de aquel entonces (2012 – 2015), en reunión extraordinaria del consejo municipal de gestión del riesgo realizada el día 17 de febrero de procedió a declarar la calamidad pública y urgencia manifiesta tras la emergencia invernal (Decreto 014 del 18 de febrero del 2013), para priorizar las ayudas humanitarias, contratación de obras.

Después se destinó como lugar de albergue temporal a la casa campesina: allí se atendieron cerca de 40 familias damnificadas, no solo del barrio Bariloche sino de otros trece barrios

*Figuras 9, 10, 11 y 12.* Acciones de remoción de materiales deslizados, mediante herramientas manuales y mingas comunitarias en el barrio Bariloche II. Abajo la maquinaria prestada por un empresario vecino.



Fuente: Vanguardia.com (2013a); Oriente Noticias Canal TRO (2013).

y de diez veredas afectadas (vg las Amarillas, entre otras), con vías incomunicadas, cultivos, acueductos y muchas casas destruidas. El acceso a Piedecuesta, por la autopista desde Bucaramanga, quedó restringido por los desbordamientos e inundaciones; la captación del acueducto municipal fue arrasada y taponada, con escombros vegetales y sedimentos, quedándose sin agua el área urbana. Y se suspendieron las clases en todo el municipio.

Luego, en los días subsiguientes, arribó a la zona maquinaria pesada ordenada por la alcaldía, mediante un buldócer Caterpillar y una retroexcavadora pajarita, para el perfilado parcial de los taludes (Figura 13).

*Figuras 13.* Acciones de descargue de la pata del sector desestabilizado. Se nota la retroexcavadora actuando, con la seguridad de la policía nacional.



Fuente: Vanguardia.com (2013a).

#### **3.4. Fase de Recuperación y Estabilización del Talud**

Se relacionan en primera instancia los estudios y las medidas de manejo, mediante la construcción de un canal perimetral para captar las aguas superficiales y de un cerramiento en malla eslabonada, aplicadas en los costados de los dos tanques de agua potable (Figuras 14 y 15), sobre la parte más superior de la vertiente occidental y colindante al talud desestabilizado. Las obras estuvieron a cargo del ing. Carlos Alberto Duarte, de la dirección de Planeación e

Infraestructura de la PDS, quien manifestó que con ellas se “recoge reboses del tanque para depositar al sistema de alcantarillado evitando que las aguas escurran por el talud”, como se

*Figuras 14 y 15.* Imágenes con el inicio del desplate de las obras de drenaje superficial, adyacentes a los dos tanques de la PDS. A la izquierda la armadura para las columnas del encerramiento y, en ambas fotografías, se detalla el nuevo canal perimetral, con el cual se manejarían las aguas de rebose de éstos.



extractó de un video (PrensaPiedecuestana Pta, 2015).

Fuente: PrensaPiedecuestana Pta (2015).

También, como acciones de mitigación y producto de un fallo en primera instancia de una tutela instaurada por los residentes damnificados, hubo un acuerdo entre estos y las entidades involucradas. Entonces la municipalidad procedió a la empradización de 2.400 m<sup>2</sup> sobre el talud del cerro de la Cantera en el sector objeto de la citada emergencia por movimientos en masa. El convenio interadministrativo fue firmado por un valor de \$48.000.000, cuyas obras a septiembre del 2015 avanzaban en su etapa final (Figura 16) para la empradización en la zona.

Según la ing. ambiental Adriana Lizeth Ortiz, de la Secretaria de Infraestructura, “cumple con todos las normas técnicas y requisitos del trabajo; incluso el contratista hizo 100 metros cuadrados más (para un total de 2.500 m<sup>2</sup>) abonados con material orgánico y una siembra de semilla de pasto brachiaria, que es la más fuerte en el mercado para la estabilización de taludes”. La funcionaria

agregó que dentro de las normas técnicas se realizó la respectiva inspección, mantenimiento, barrido, limpieza del terreno y se hizo la siembra de las plántulas y pastos acorde a las especificaciones técnicas, instalación de trinchos y riego en la longitud del área requerida en crecimiento (Vanguardia.com, 2015).

*Figura 16.* Obras de empradización en el talud del Bariloche II etapa. Se observa un amplio sector sin vegetación en donde se aplicaron tramos de guadua anclada con escasos estolones de pasto vetiver. Arriba, a la izquierda, hay riego puntual con abono orgánico.



Fuente: Vanguardia.com (2015).

Posteriormente, el Area Metropolitana de Bucaramanga contrató en el año 2015 al Consorcio Geingeniería (con sede legal en Bogotá D. C.) para realizar la consultoría del diseño de las alternativas de mitigación a los procesos de remoción en masa, sector Bariloche II etapa, Piedecuesta, cuyos informes, planos y anexos se entregaron en febrero del 2016. Gran parte de esta información ha sido considerada, descrita y discutida en los ítems anteriores. Para inicios de julio del 2017, a petición del líder comunal Oscar Humberto Cote, el AMB desplazó y destinó

horas de equipos -contratada dentro de su bolsa de maquinaria- para el mantenimiento y rehabilitaron de las terrazas en tierra de la zona evaluada.

Lo anterior debido a las caídas rocosas de gran tamaño y desprendimientos de tierra, como un “verdadero ‘dolor de cabeza’ por la posibilidad de ocasionar una grave lesión de algún habitante del sector”; las actividades incluyeron el despeje de maleza y de tierra que rodeaba gran parte del salón comunal que, según el alcalde, pronto reabrirá sus puertas como restaurante escolar (Vanguardia.com, 2017).

Para enero de 2019 el peligro geomorfológico y/o geotécnico parecía acentuarse, según el titular “Talud amenaza con destruir 72 viviendas del barrio Bariloche en Piedecuesta” (Vanguardia.com, 2019b). Se resalta que no hubo mantenimiento de las obras biotécnicas descritas (abono, resiembra, reconstrucción de guaduas, etc.), por lo menos entre los años 2016 a 2018.

*Figura 17 y Figura 18.* Estado de deterioro de los trinchos en guadua aplicados sobre los taludes del terraceo efectuado, desde el 2015: izquierda, con segmento intermedio destruido y ahora sin vegetación, erodado; derecha, detalle de las guaduas podridas. Fecha de registro: 2019-05-25.



Fuente: Autor.

## 4. Caracterización geoambiental: geología y unidades superficiales

### 4.1. Marco Geotectónico

Las cordilleras y valles del país obedecen a un complejo contexto, tectónicamente hablando, producido por la interacción de las placas de Nazca, Caribe y Suramericana, que hacen a su territorio muy activo geodinámicamente. Así, los Andes Colombianos han producido una compleja amalgamación de diversos terrenos alóctonos y autóctonos, desde el Precámbrico al Fanerozoico, actualmente con marcada subducción profunda al occidente (zona de Benioff-Wadatti y fosa del Pacífico) y subducción somera bajo la costa Caribe (adaptado de: Alemán y Ramos, 2000).

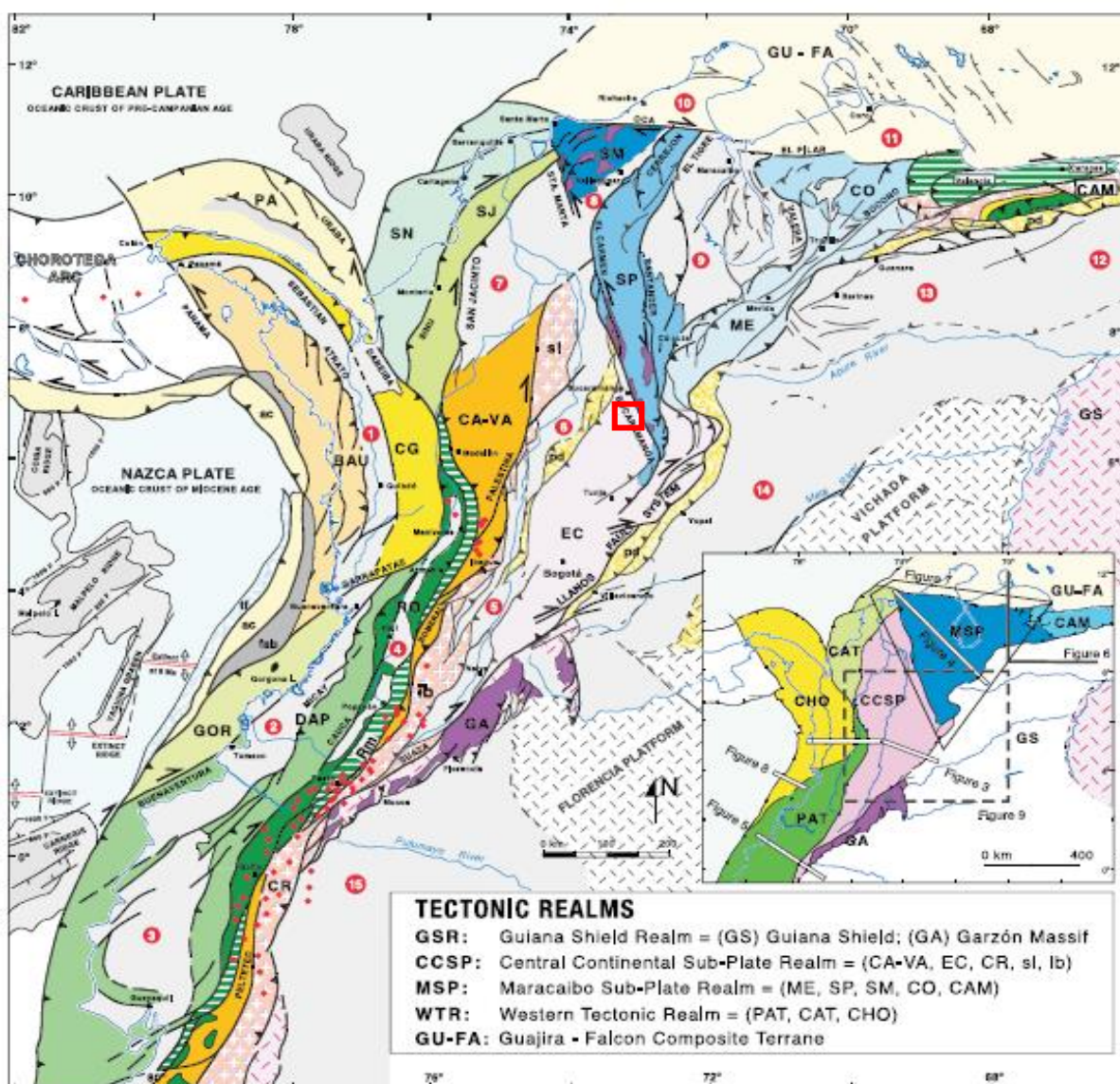
El área de investigación se encuentra ubicada, a nivel regional, dentro del sistema orogénico también llamado Bloque Andino (Pennington, 1981) o Andes del Norte, junto con los Andes de Mérida y Ecuador (Gansser, 1973); más específicamente en el departamento de Santander en Colombia, el cual se encuentra haciendo parte de la provincia tectónica Cordillera Oriental, según un esquema tectónico caracterizado por pliegues anticlinales y sinclinales amplios, limitados por fallas inversas y cabalgamientos, de direcciones preferenciales NE y NW, con inclinación predominante hacia el oriente (adaptado de: Royero & Clavijo, 2001).

En la Figura 21 se observa un mapa litotectónico y morfoestructural de Suramérica elaborado por Cediel et. al. (2003), con el área de estudio dentro del recuadro de color rojo y la identificación de las principales estructuras debido a la dinámica registrada entre la interacción de las placas geológicas mencionadas anteriormente a lo largo del tiempo geológico con además la ubicación de la mismas y su cinemática.

La actividad sísmológica, y la amenaza sísmica relacionada, se describen brevemente más adelante (aunque está fuera del alcance de esta tesis), una vez sea descrita la geología local.

Figura 19. Mapa litotectónico estructural del norte de Suramérica.

S =Escudo Guiana; GA = Macizo de Garzón; SP =Macizo de Santander-Serranía de Perijá ; ME =Sierra de Mérida; SM =Sierra Nevada de Santa Marta; EC =Cordillera Oriental; CO =Cuenca Carora; CR = Cordillera Real; CA-VA =Terreno Cajamarca-Valdivia ; sl =Bloque San Lucas ; ib =Bloque Ibagué; RO =Terreno Romeral ; DAP =Terreno Dagua-Piñon ; GOR =Terreno Gorgona ; CG =Terreno Cañas Gordas ; BAU =Terreno Baudó; PA =Terreno Panamá; SJ =Terreno San Jacinto; SN =Terreno Sinú; GU-FA =Terreno Guajira-Falcon ; CAM =Terreno Montañoso Caribe; Rm =Romeral mélange; fab =Cuenca fore arc ; ac =prismas acrecionario; tf = trench fill; pd =pedemonte; 1 =Cuenca Atrato (Chocó) ; 2 =Cuenca Tumaco ; 3 =Cuenca Manabí ; 4 =Cuenca Cauca-Patía ; 5 =Cuenca Magdalena Superior; 6 =Cuenca Medio Magdalena ; 7 =Cuenca Magdalena Inferior; 8 =Cuenca Cesar-Ranchería; 9 = Cuenca Maracaibo; 10 =Cuenca Guajira ; 11 =Cuenca Falcon ; 12 =Cuenca Guárico ; 13 =Cuenca Barinas ; 14 =Cuenca Llanos ; 15 =Cuenca Putumayo-Napo.



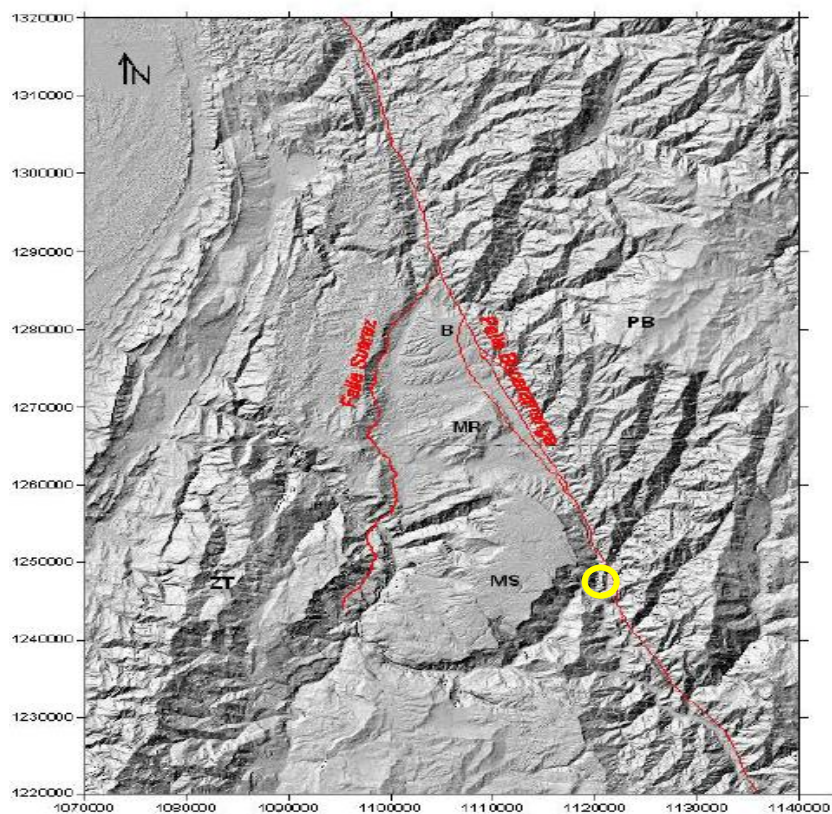
Fuente: Cediél et al. (2003).

**2.1.1. Sismotectónica subregional y amenaza sísmica.** Santander es, según Reyes y Alvarez (2007), representativo de la zona de confluencia de las placas ya citadas, y uno de sus productos es el bloque Andes del Norte o bloque Norandino, conforme varios autores (Kellogg, 1984; Case et al., 1984, Kellogg et al., 1985; James, 1985; Boinet, 1985: en Royero y Clavijo, 2001); en el mapa de terrenos geológicos de Colombia (Etayo et al., 1983) Piedecuesta y el sur del AMB forman parte del “supraterreno Cretácico de la Cordillera Oriental”; y, según Julivert (1968), Piedecuesta estaría dentro de la zona de Mesas y Valles. La alta actividad sísmica en el departamento de Santander, en términos generales, es superficial a intermedia; la región nororiental se ve especialmente influenciada por la presencia de los sistemas de fallas geológicas de Bucaramanga, Suárez y Suratá como se observa en la Figura 22, y más al occidente por el sistema de fallas de la Salina, límite oriental del valle del Magdalena (Reyes y Alvarez, 2007).

Otra sismofuente importante, no sólo regional sino nacional, corresponde al Nido Sísmico de Bucaramanga (NSB), cuya sismicidad se refleja en valores de alta intensidad, sentidos con frecuencia por la comunidad del AMB y que posee reportes de daños en algunas edificaciones e infraestructuras; representa el 60% de la sismicidad local reportada por la Red Sismológica Nacional de Colombia (Adaptado de: Reyes y Alvarez, 2007).

Se ubica a 35 kilómetros al sureste del área urbana en estudio, debajo de los municipios de los Santos, Cepitá, Aratoca y Jordán, con alta actividad intermedia que fue detectada inicialmente, al parecer, por Tryggvason y Lawson, y Santo (1969: en Reyes y Alvarez, 2007), posteriormente evaluada con microtemblores por Pennington (1979: en Reyes y Alvarez, 2007) y mediante inversión de tensores por Rivera (1989: en Reyes y Alvarez, 2007).

*Figura 20.* Localización del Cerro la Cantera (en el círculo amarillo) y las principales geoformas y fallas geológicas asociadas. B: Bucaramanga, MR: Mesa de Ruitoque, MS: Mesa de los Santos, ZT: Zapatoca, PB: Páramo de Berlín.



Fuente: Diederix et al. (2008).

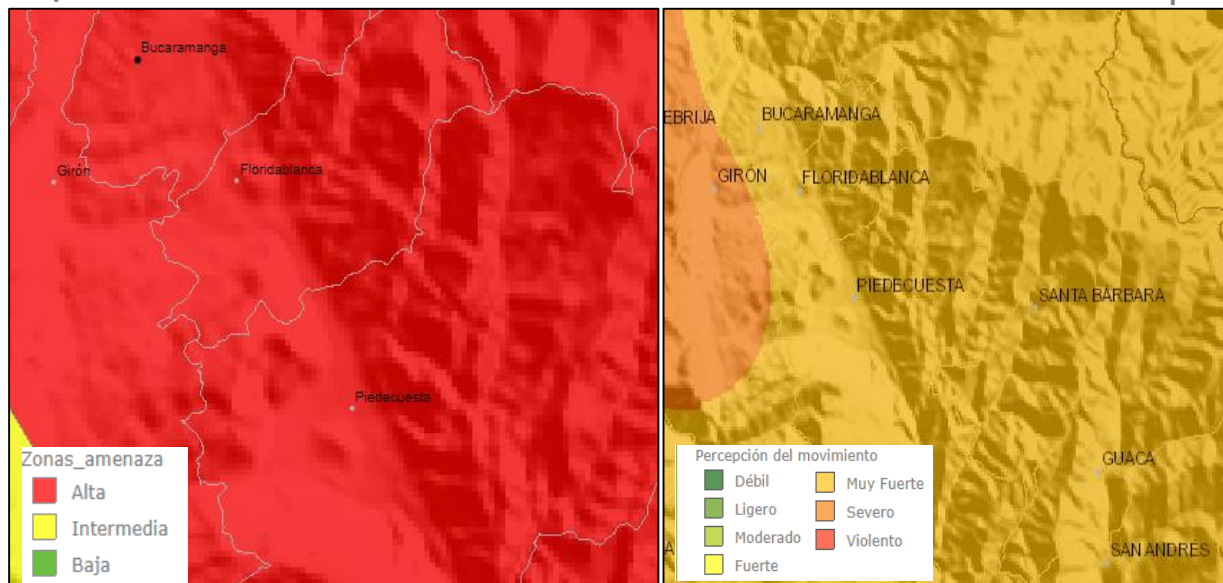
Los focos están localizados a profundidades mayores a 120 km, típicamente entre 150 y 165 km, concentrada en un volumen no mayor a  $10 \text{ km}^3$ ; cuya población de temblores le da un carácter de “nido sísmico”, bajo la latitud  $6.8^\circ \text{ N}$  y  $73.1^\circ$ , con un azimut cerrado este-oeste y *plunges* ligeros hacia el este (Reyes y Alvarez, 2007). Esta sismofuente es muy importante para la zona de estudio, que posiblemente obedece a la colisión de la placa de Nazca con la placa Caribe, bajo la placa Suramericana, originando un total de 1223 sismos dentro del departamento de Santander entre los  $6-8^\circ \text{ N}$  y  $72-74^\circ \text{ W}$  entre enero de 2012 y junio de 2016 (adaptado de: Sepúlveda y Cabrera, 2018).

De acuerdo al numeral A.2.3 de la NSR-10 el municipio de Piedecuesta está dentro de una zona con amenaza sísmica alta; que es acorde al SGC (2019) y a las intensidades esperadas, que se catalogan como muy fuertes, conforme es observado en las Figuras 23 y 24.

*Figura 21 y Figura 22. Mapa de Amenaza Sísmica NSR-10 (izquierda) y Mapa de Zonificación de la Intensidad Sísmica Esperada (derecha).*

**Mapa de Amenaza Sísmica NSR-10**

**Zonificación de la Intensidad Sísmica Esperada**

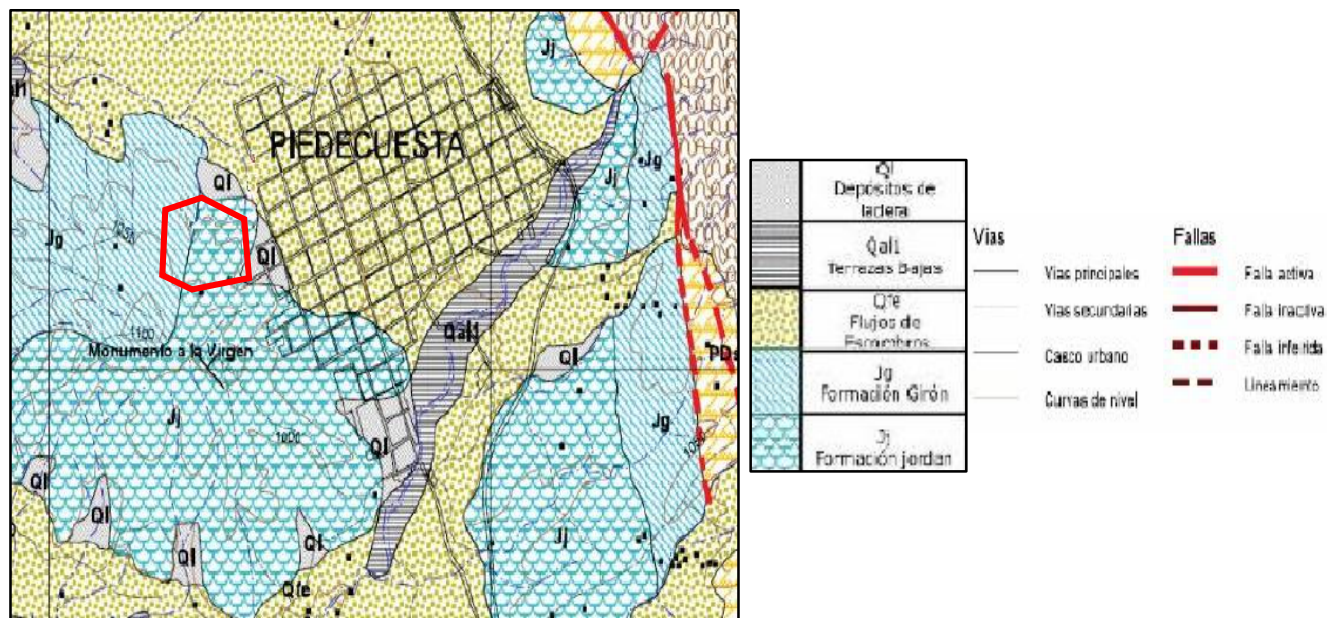


Fuente: SGC (2019).

#### 4.2. Unidades Litoestratigráficas Locales

Las unidades litológicas presentes en la zona evaluada son principalmente sedimentarias detríticas o siliciclásticas, tanto rocas estratiformes como depósitos sedimentarios, de los periodos Jurásico al Cuaternario, con distintas tipologías y edades. Ellos, se distribuyen conforme la Figura 25, considerando la cartografía geológica oficial del Ingeominas (2001); sin embargo, debido a su escala subregional, esta se complementó con la información elaborada por el AMB - Geoingeniería (2016). La tesis de Jaimes (2016), no produjo específicamente un mapa geológico detallado, por lo que dentro de la presente tesis se realiza este mapa, el cual se puede encontrar en el **anexo 02**.

Figura 23. Ubicación del área de estudio (dentro del polígono rojo) sobre el mapa geológico, a escala 1:25.000, elaborado en la microzonificación sísmogeotécnica indicativa del AMB.



Fuente: Modificado de Ingeominas (2001).

A continuación, se procederá a describir las unidades litológicas evidenciadas superficialmente sobre el área de estudio, iniciando con las más antiguas y terminando con las más recientes. En el listado de anexos se presenta la cartografía temática, el Mapa Geológico detallado (Anexo 2), elaborado a escala 1:800, posee los símbolos y colores del léxico estratigráfico internacional, en armonía con la nomenclatura litoestratigráfica del SGC (2015).

**4.2.1. Formación Jordán (Jj).** Consta en general de niveles lodosos, aunque al sur (en el conjunto El Zafiro) dominan las areniscas pardo-violáceas (Figura 26). En el sur-oriente del área de estudio, desde el flanco occidental del polideportivo pocos metros detrás del salón comunal del barrio Bariloche II, aflora así: mayormente limolitas de grano grueso con arenas muy finas, en una matriz de arcilla violácea, con cemento ferruginoso, micas y en niveles gruesos moderadamente consolidados (Figura 27); en la parte media principalmente posee lodolitas (limolitas arcillosas) rojizas, en capas delgadas a medias y más friables (Figura 28).

*Figura 24.* Formación Jordán (Jj), observada al sur de la zona de estudio: intercalaciones de areniscas en capas medias con lodolitas, blandas y erodables. Las capas buzcan 20° al NE, hacia la derecha.



Fuente: Autor.

*Figura 25.* Base de la Formación Jordán dentro de la zona de estudio: limolitas de grano grueso con arenas finas y matriz arcillosa violácea, detrás del comedor comunal. Los dos marcadores indican el inicio de un horizonte incipiente de suelo residual (saprolito fino), desarrollado encima de la roca.



Fuente: Autor.

*Figura 26.* Detalle de la unidad sedimentaria rocosa Jj, sector friable: limos arcillosos, cuya variación granulométrica y de humectación-secado facilitan la meteorización mecánica. Punto de toma: contiguo a la manzana N del barrio Bariloche II, sector norte.



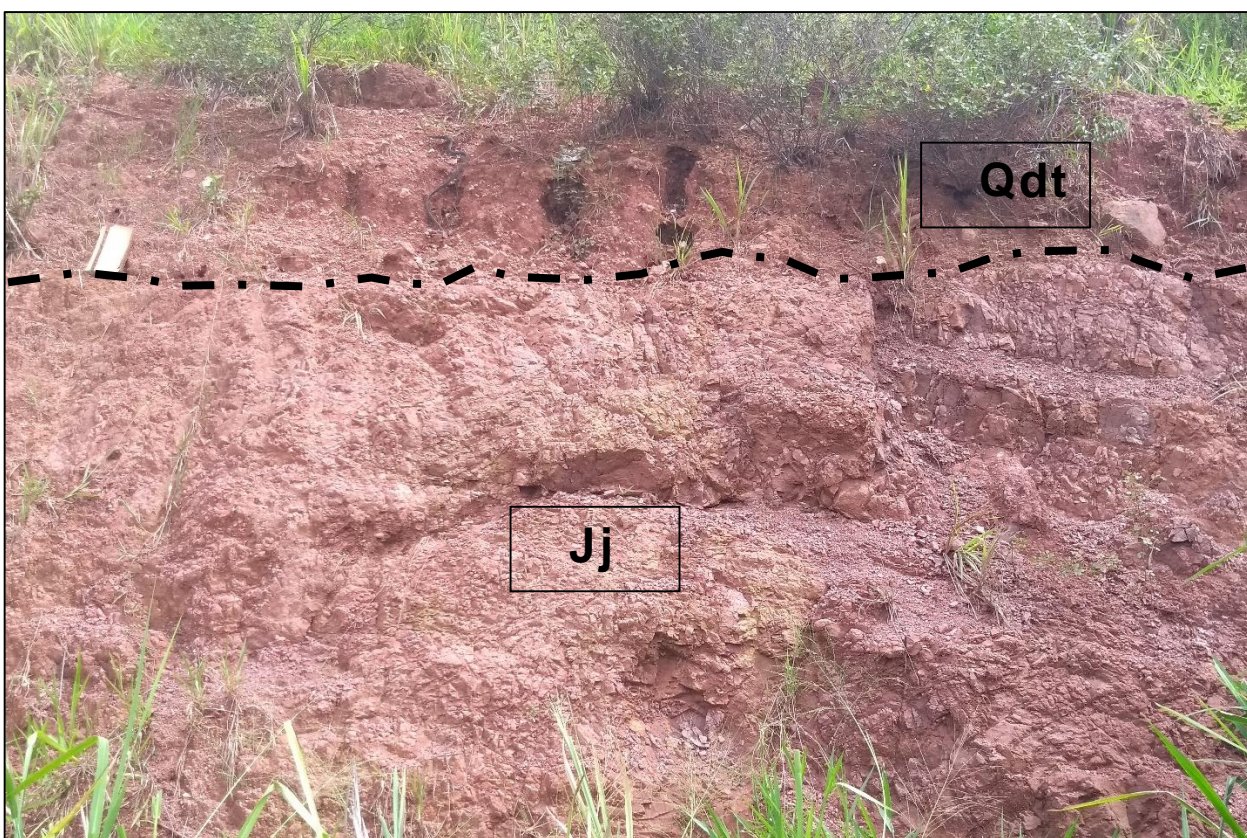
Fuente: Autor.

Pueden tener laminación (plano-paralela discontinua) y delgadas capas arenosas; poseen localmente esporádicos nódulos blanquecinos, arcillosos.

La Formación Jordán en el Cerro de la Cantera y al occidente del barrio Bariloche II está cubierta en forma discordante por coluviones (o depósitos de ladera, Q1, según el anterior mapa de la Figura 25) y materiales de remociones (Figura 29). Se infiere como la parte estratigráfica más superior de esta unidad litológica. El contacto con la suprayacente litounidad (el grupo Girón)

no es evidente en el área evaluada; pero se infiere como un contacto fallado, dadas las evidencias geofísicas y los controles de los rasgos geoestructurales locales, que se exponen más adelante.

*Figura 27.* Detalle de la unidad Jj, en su expresión lodosa. Note, en la zona superior y desde la libreta (a la izquierda, como escala), el inicio de la unidad de remoción en masa (Qdt), con líticos angulares.



Fuente: Autor.

**4.2.2. Formación Girón (Jg).** Dado su amplio patrón de afloramiento, metropolitano y regional, se amplía aquí su identificación y descripción. Inicialmente el término “Girón Series” fue creado por Hettner (1892) para designar una megasecuencia aflorante al occidente de Bucaramanga en los alrededores de Girón, Santander; pero fue Langenheim (1954; en Navas, 1963) quien fijó la sección tipo en la Angostura del Río Lebrija y la dividió en tres miembros: uno inferior arenoso (750 m), el intermedio lodoso (1250 m) y otro superior arenoso (1500 m), con espesor total de 3500 m.

Navas (1963), exprofesor de la UIS, hizo un estudio detallado del Girón en la sección del Río Lebrija, sobre el ferrocarril de Bucaramanga a Puerto Wilches, entre las estaciones de Bocas y Conchal. Allí el Grupo Girón presenta una potencia de 2.600 m, en los cuales se distinguen en forma clara cinco niveles: un nivel inferior lutítico que en 'su mitad superior alterna con areniscas (550 m); un nivel arcósico inferior (170 m); un nivel superior de lutitas rojas alternando con areniscas (850 m); un nivel arcósico superior (700 m); un nivel de lutitas rojas (230 m).

Estos niveles se encuentran ampliamente distribuidos al occidente de la Falla del Suárez, mientras que en su flanco oriental aparecen solo los dos niveles más inferiores. La base del Girón, al sur de Piedecuesta, está apoyada sobre el metamórfico y aparece un conglomerado basal de cantos ígneos y porfídicos; el techo está determinado por la discordancia Girón-Cretácica (Navas, 1963).

Otro estudio detallado completo fue la tesis doctoral de Cediél (1968): usó la sección tipo del Río Lebrija y midió un total de 4.650 m y lo dividió en ocho conjuntos litológicos (A-H), que corresponden a las Formaciones Girón (conjuntos A-G, del Jurásico Superior) y Los Santos (H, del Cretácico inferior).

Clavijo, et al. (1993: en Royero & Clavijo, 2001) en la guía de excursiones geológicas del IV Simposio de Geología Regional, propuso el término de Formación Angostura del Río Lebrija, para reemplazar el de Formación Girón del Jurásico superior que corresponde a la unidad inferior del Grupo Girón de Cediél (1968). La Formación Girón reposa en discontinuidad estratigráfica sobre las Formaciones Bocas y Jordán e infrayace concordantemente a la Formación Los Santos. Para el Grupo Girón se ha establecido una edad Jurásico superior a Cretácico inferior.

Esta unidad es encontrada al occidente del barrio Bariloche II Etapa, en algunos cortes de la zona terraceda para estabilizar la citada ladera; y al norte, sobre los taludes de la carretera que comunica al tope del cerro, hacia el monumento a La Virgen.

Allí, a margen izquierda, afloran capas medias a delgadas de areniscas, con tamaño de grano que varían de muy fino a fino (Figura 30) en matriz lodosa, de color rojizo, y también limolitas.

*Figura 28.* Capas masivas de areniscas de la unidad Jg, con alto grado de fracturamiento, sobre la vía Bariloche II al Cerro Virgen de La Cantera). La brújula geológica se apoya sobre la



Fuente: Autor

Dentro de la zona su mejor y más amplia exposición, tanto lateral como verticalmente, está al costado norte: muestra una secuencia predominantemente granular fina, consolidada y dura, integrada en la base por areniscas fino-granulares, micáceas, con cemento silíceo y en menor proporción ferruginoso, algunas micas y en capas más gruesas; al tope posee limolitas (Figura 31), por lo cual la secuencia tiene una tendencia estratigráfica local grano-decreciente.

*Figura 29.* Formación Girón (Jg) expuesta en los cortes al norte de la zona de estudio: en la base areniscas cementadas, en bancos que varían transicionalmente (desde la parte media de la fotografía) a limolitas violáceas, en capas más delgadas, notadas bajo el morral. Vía hacia la cantera, a la derecha.



Fuente: Autor.

Estas capas poseen un grado de fracturamiento muy alto, posiblemente está asociado al sistema de fallas de Bucaramanga-Santa Marta (AMB, 2016), y muy posiblemente dentro de la zona de influencia de la falla de Ruitoque. El Grupo Girón se ocidente del barrio Bariloche II está cubierto en forma discordante por depósitos coluviales (Qca y Qcr), que enuncian enseguida.

### 4.2.3. Depósitos Coluviales Antiguos (Qca).

Integrados por bloques heterogéneos y heterométricos de conglomerados guijosos, arenitas y lodolitas meteorizadas, en una matriz lodo-soportada varicolorada, según las Figuras 32 y 33.

*Figura 30.* Panorámica de una parte de la unidad identificada como Depósito Coluvial Antiguo (Qca), en terrenos de la finca la Cantera.



Fuente: Autor.

*Figura 31.* Depósito Coluvial Antiguo (Qca), integrado por bloques rocosos de arenitas y conglomerados, duros, dentro de una matriz granular a fina, anaranjada. La persona señala al norte; el barrio Bariloche se observa en la parte superior.

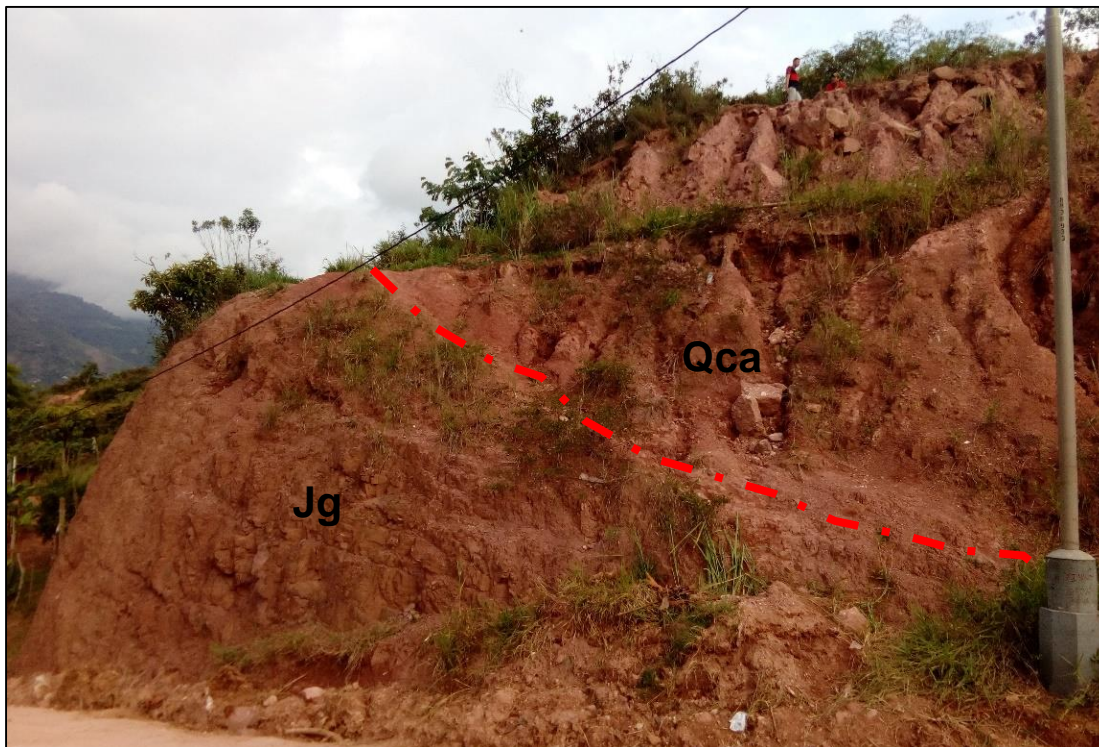


Fuente: Autor.

En la parte superior del afloramiento indicado en la Figura 34 se evidencia el contacto litológico discordante, junto a la acción morfodinámica exógena sobre tales Depósitos Coluviales Antiguos.

Estos procesos geomorfológicos se evalúan en el capítulo respectivo.

*Figura 32.* Deposito Coluvial Antiguo (Qca), sujeto a erosión hídrica, suprayaciendo discordantemente a la Formación Girón (Jg). Imagen tomada desde la vía al Cerro de la Cantera. Al tope dos personas de escala.



Fuente: Autor.

**4.2.4. Depósitos Coluviales Recientes (Qcr).** Abarca a los sedimentos arenosos y gravosos, en matriz limo-arcillosa amarillenta, rojiza y anaranjada, blanda. Posee gravas heterométricas muy angulares, con bloques de hasta 3.2 m de diámetro (Figuras 35 a 37): se componen de conglomerados, areniscas duras y lodolitas meteorizadas. Al tope de la ladera ellas son más escasas y es posible observar un nivel ocre lodo-soportado en forma discontinua.

*Figura 35.* Depósito Coluvial Reciente (Qcr): vista a la zona desestabilizada en el año 2013, con un gran bloque rocoso (persona para sobre el), ubicada al sur sobre la berma 1.



Fuente: Autor.

*Figuras 33 y 34.* Depósito Coluvial Reciente evidenciado por bloques rocosos con presencia de materiales de tamaños de guijos y guijarros, estación geológica 18(izquierda) y 11 (derecha).



Fuente: Autor.

**4.2.5. Depósitos de Taludes y bermas (Qdt).** Son los sedimentos heterogéneos dispuestos antrópicamente (de materiales naturales excavados, de terracedos y de las remociones en masa intervenidas por la municipalidad de Piedecuesta y el AMB) sobre la base de la ladera occidental los taludes de corte, bermas y dentro de una matriz areno-guijosa de colores pardo-rojiza y anaranjado, con moteados blanquecinos por alteraciones de minerales arcillosos y suelta. Ocurren algunos bloques rocosos, conglomeráticos, de 1.2 m de diámetro máximo, como los de la Figura 38.

*Figura 36.* Depósito de taludes y bermas (Qdt): material areno-lodoso rojo-amarillento, reconformado en el nivel inferior de la ladera terracedada. Se destaca dos bloques conglomeráticos (debajo del morral).



Fuente: Autor.

**4.2.6. Depósitos de Llenos de Origen Antrópico (Qllen).** Integrados por mezclas de materiales heterogéneos (de origen geológico natural, escombros de construcción y basuras, Figura 39), y/o material de remociones recientes, relacionados al deslizamiento y flujo ocurridos en febrero del 2013, de matriz granular parda no consolidada

*Figura 37.* Depósitos de llenos antrópicos (Qllen), con escombros y restos de plásticos envueltos en matriz areno-gravosa. Ubicación: frente de la manzana O del Barrio Bariloche II.



Fuente: Autor.

### **4.3. Geología Estructural**

Retomando a Reyes y Álvarez (2007) en la escala subregional el Área Metropolitana de Bucaramanga está enmarcada dentro de tres bloques tectónicos definidos por los sistemas de fallas de Bucaramanga (SFB), del río Suárez (FRSU) y sistemas de fallas normales ortogonales; sus movimientos han generado también depresiones tectónicas y valles de los ríos Suratá, Frío y del Oro, con relleno de origen aluvial, aluvio-torrencial y de piedemonte que hoy día siguen ocurriendo (v.g. abanico de Bucaramanga y depósitos entre Floridablanca y Piedecuesta).

El bloque occidental está conformado por rocas sedimentarias de edad Jurásico, con los mayores patrones de afloramiento en la región, que constituyen la Mesa de Lebrija (con alturas por encima de los 1000 msnm); el bloque central, sobre el cual está Bucaramanga, se relaciona

con la unidad morfológica de abanico (hoy Formación Bucaramanga). Y en inmediaciones del sector sur del AMB, en donde se ubica el área urbana de Piedecuesta, hay expuestas rocas de distinto origen y depósitos sedimentarios muy variados, con edades que van desde hace más de 600 millones de años hasta el presente, pertenecientes a las formaciones Jordán (Jj) y Girón (Jg). Esta última litounidad ha sido levantada y expuesta en los bordes de las mesas de Lebrija, Ruitoque y los Santos y conforma, predominantemente, el sustrato de los depósitos sedimentarios en el nivel metropolitano, tal como se describe más adelante (Adaptado de: Reyes y Álvarez, 2007).

**4.3.1. Fallas geológicas locales.** En inmediaciones del Cerro de la Cantera, sobre su flanco noroccidental existen planos de discontinuidades estructurales, relacionados a posibles sistemas de fallas normales a inversas, cuyos datos fueron medidos con brújula geológica Brunton International se plasma en la Tabla 2. Las Figuras 38 a 41 muestran tres fallas geológicas identificadas en la zona de interés.

Tabla 2.

*Datos de fallas geológicas evidenciadas superficialmente en campo.*

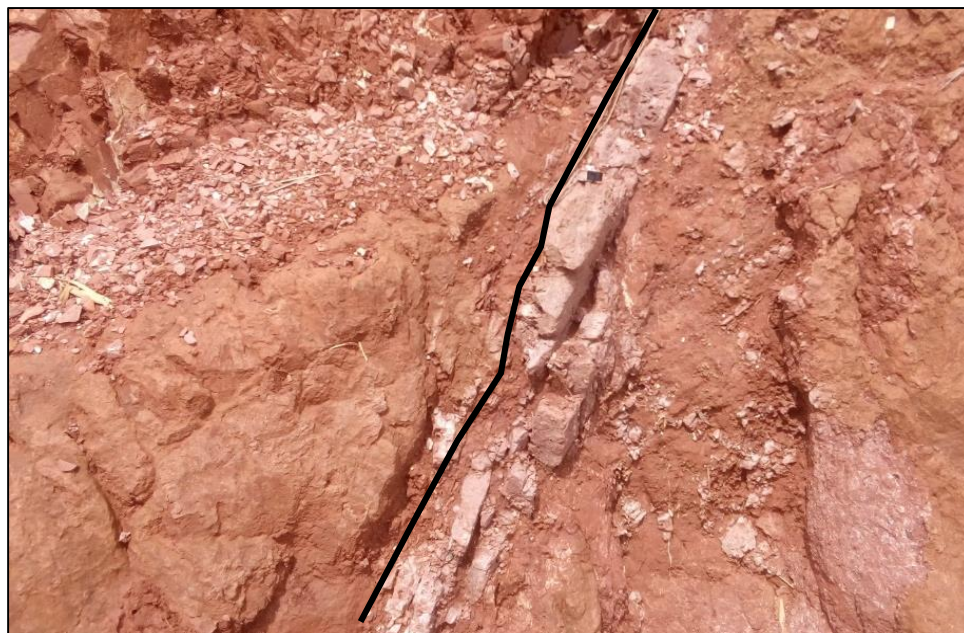
Estación	Planos de Falla (F) y familias, según la orientación	Movimiento
<b>EG3a</b>	F1: N75°E/69° SE	Normal
<b>EG3b</b>	F1: N87°E/74° SE	Normal
<b>EG18</b>	F2: N18°W/82°NE	Inversa
<b>EG2a</b>	F2: N18°W/82°NE	Inversa
<b>EG2b</b>	F2: N5°E/65° SE	Inversa

Fuente: Autor.

Estos datos fueron tratados con métodos de representación estereográficos, para ver la tendencia de orientación. Está por fuera de la tesis analizar los tensores de esfuerzos o su microtectónica.

Se encuentra que ocurre un sistema de deformación ortogonal y conjugado, con una tendencia de orientación de los planos de fallas hacia el oriente (NEE) y norte (NNW), y buzamientos fuertes a verticalizados. Podría obedecer a un régimen tectónico distensivo, relacionado al rift del Jurásico.

*Figura 38.* Formación Jordán (Jj) con la presencia de una superficie de falla que evidencia un desplazamiento de esta unidad localizada en la berma 2.



Fuente: Autor.

*Figura 39.* Roca vs Suelo ubicada en el costado W y acceso al vivero en vía al Cerro la Cantera. Se presenta depósito coluvial antiguo (Qca) y Formación Girón (Jg) fallada a la derecha. Toma del 13 de junio de 2019.



Fuente: Autor.

*Figura 40.* Detalle del plano (bajo la brújula) de discontinuidad estructural secundario, asociado a una falla de tipo normal. El punto se observa a la izquierda de la fotografía anterior.



Fuente: Autor.

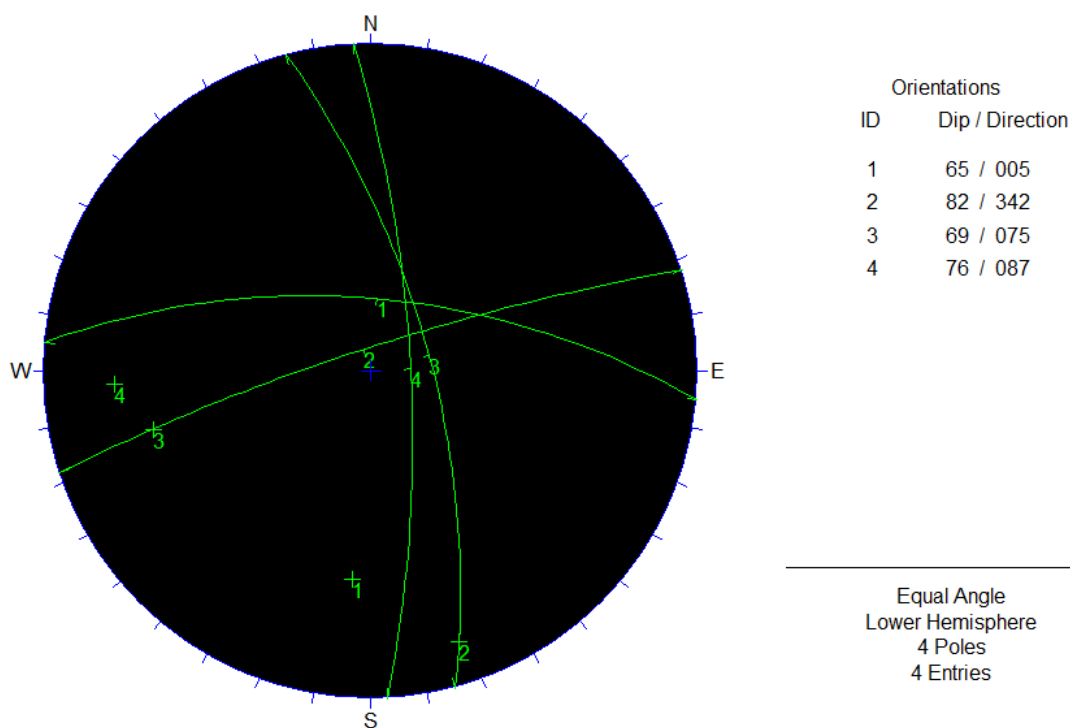
*Figura 41.* Roca vs Suelo, se observa el tope de la berma 1 y un contacto fallado entre la unidad cartografiada como Deposito de Talud (Qdt) y Formación Jordán (Jj). Imagen de 7 de abril de 2019.



Fuente: Autor.

A partir de los datos estructurales recolectados en campo se realiza su proyección estereográfica (Figura 42) mediante el software *Dips* de *Rockscience*, en la que es posible observar la clara tendencia de dos familias a partir de la agrupación de los polos representados, una familia al W y la otra en el SW, además es posible determinar que la tendencia de los planos puede ser favorable a la generación de deslizamiento planar según su análisis cinemático debido a la dirección de F1 en EG3a y EG3b (Tabla 3), y a su vez se presentan las condiciones para un deslizamiento en cuña.

Figura 42. Proyección estereográfica de los datos de fallas geológicas.



Fuente: Autor.

**4.3.2. Análisis de Sistemas de Fracturación.** A partir del control de campo realizado durante la realización del trabajo de investigación fue posible la recolección de datos estructurales correspondientes a los planos de discontinuidad primaria (estratificación) y secundarias (sistemas de fracturación, como diaclasamientos, fallas geológicas, etc.). Tales geoestructuras fueron observadas en las estaciones geológicas, clasificadas, georreferenciadas, fotografiadas y medidas

con brújula Brunton International, cuyos datos de orientación como se muestran en la Tabla 3. Fueron recolectados cuatro datos de estratificación de la Formación Girón indicando la dirección de las capas en las ubicaciones de las estaciones geológicas, a su vez se tomaron datos estructurales de las familias de diaclasas identificadas en cada estación, que actúan como porosidad secundaria por actividad tectónica.

Tabla 3.

*Datos estructurales de sistemas de diaclasas tomados en campo.*

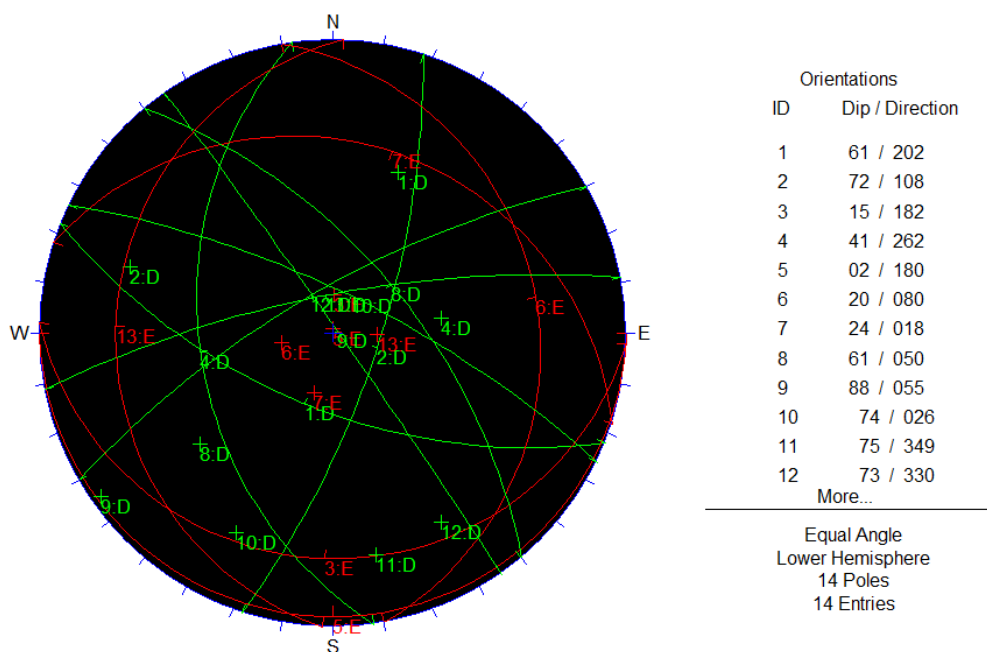
Estación	Estratificación	Diaclasa (D)	Planos de Falla (F)
<b>EG1</b>	-	D1: N22°E/61°NW; D2: N82°E/41°NW; D3: N72°W/72°SW	-
<b>EG2</b>	N2°E/18 NW	D1: N26°E/74°SE; D2: N11°W/75°NE	-
<b>EG12</b>	N2°E/15 NW	D1: N30°W/73°NE; D2: N55°E/88°SE	-
<b>EG14</b>	N80°E/20 SE	-	-
<b>EG16</b>	N88°W/17 NE	-	-
<b>EG18</b>	-	D1: N17°W/81°E; D2: N50°E/61°S	-
<b>EG19</b>	N18E/24 N	-	-

Fuente: Autor.

Los datos recolectados de los planos de discontinuidades primarias y secundarias (Tabla 3) se analizaron por medio de una proyección estereográfica (Figura 43) mediante el software *Dips* de *Rockscience*, los planos y polos de color rojo representan los datos estratificación y los de color verde los de diaclasas. En el análisis estereográfico percibir la clara tendencia de agrupación de los polos de estratificación en una zona (al centro) excepto para un dato, para los datos de diaclasas se presenta una agrupación de polos en alrededor de cuatro zonas que evidencia la variación en sus direcciones. Además, es posible determinar que la tendencia de los planos puede presentar una condición favorable para la generación de deslizamiento planar, cuña y en *toppling* según el

análisis de los planos expuestos en la proyección, aunque se necesita un estudio más profundo (que no es objetivo del presente trabajo) para un resultado concluyente sobre la cinemática.

*Figura 43.* Representación estereográfica de los datos estructurales de discontinuidades primarias (Estratificación) y secundarias (Diaclasas).

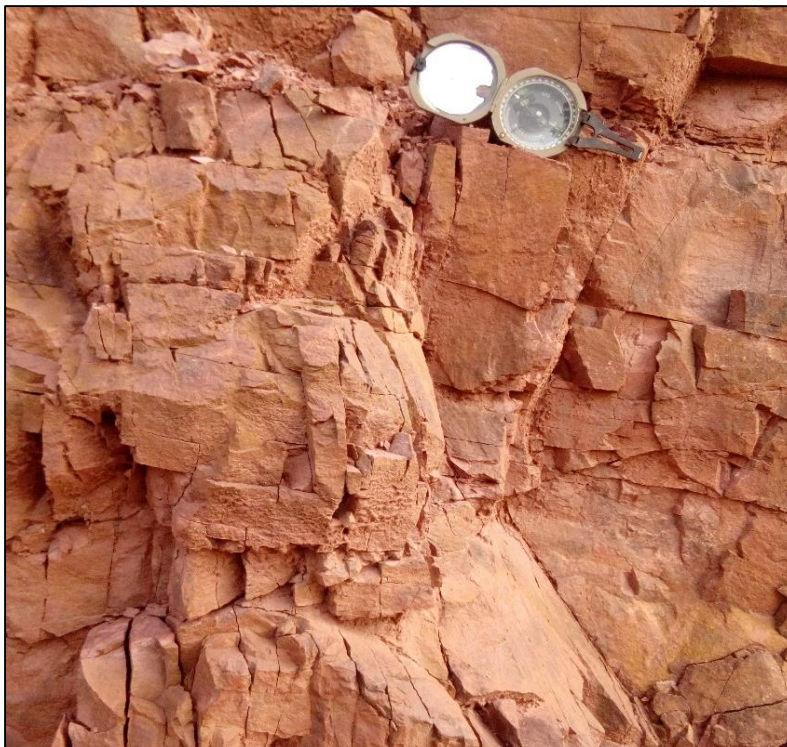


Fuente: Autor.

A partir de la distribución de las familias de diaclasas, su orientación y geometría observadas (Figura 44) en las diferentes estaciones son identificados dos tendencias: la primera es de un sistema irregular en el que no presentan un patrón definido y una segunda tendencia de un sistema ortogonal (Figura 45) con un patrón de fracturas perpendiculares, a romboédrico menor.

No es objetivo de la presente tesis llegar a un análisis microtectónico, o a la determinación del tensor de esfuerzos. No obstante, tales rasgos estructurales secundarios (diaclasas y sistemas de fracturación irregulares) si afectan al comportamiento y estado tenso-deformativo de los macizos rocosos, y se consideraron en la diferenciación de unidades rocosas para ingeniería (en las UGI).

*Figura 44.* Sistema irregular de diaclasas en el que se muestran su orientación y ángulos aleatorios. No obstante, son dominantes las dos diaclasas conjugadas, romboédricas, observadas a la derecha.



Fuente: Autor.

*Figura 45.* Sistema ortogonal de diaclasas en el que se muestra la orientación de la estratificación (buzante hacia la derecha), con ángulos perpendiculares entre sí.



Fuente: Autor.

#### **4.4. Unidades Geológicas para Ingeniería (UGI)**

Según el SGC (2015) hoy se acepta la definición de Unidades Geológicas para Ingeniería o UGI, que antes eran denominadas como formaciones superficiales (Hermelín, 1985).

Según el SGC (2015) las unidades geológicas para ingeniería (UGI) corresponden a zonas delimitadas teniendo en cuenta que representen alto grado de homogeneidad con respecto a las propiedades geotécnicas básicas, cumpliendo con las características de área y espesores mínimos cartografiables, de acuerdo con la escala de trabajo y con base en la definición de unidades litoestratigráficas.

Se denomina formación superficial a las unidades diferenciables de materiales con naturaleza física diferente, que se exponen en la superficie terrestre y llegan a alcanzar espesores importantes; constituyen la base de apoyo de las obras civiles, por lo cual el conocimiento de la naturaleza, características y fenómenos a los que están sometidas es básico en la planeación del territorio (Hermelin, 1996).

Para la denominación formal de cada unidad, en cuanto a nombre genético y símbolo, se adaptó con ayuda del profesor Germán Reyes Mendoza la tabla titulada “Nomenclatura para materiales superficiales, UGS” de la página 23 del protocolo (MINAMBIENTE, 2014).

Con base en todo lo anterior, siguiendo los lineamientos metodológicos, la información primaria procesada y descrita, junto a la obtenida en campo, laboratorio, los análisis e integración final en oficina, se delimitaron cartográficamente las zonas a escala 1:600, en el mapa 8 denominado Unidades Geológicas par Ingeniería (UGI).

Según esto, los suelos y rocas madre en la zona de estudio se estructuraron en las siete categorías genéticas principales de materiales superficiales, que fueron definidas en el presente trabajo y diverge de los estudios anteriores, están indicadas al final de la sección (véase Tabla 4).

A continuación, se describen cada una de las UGS cuantitativas, según su génesis y tipología, iniciando con las unidades de roca, luego los depósitos traslocados y al final los llenos, que son los materiales de relleno manipulados por el hombre en el desarrollo del barrio y la reconfiguración de terrazas (en la anterior estabilización de la ladera crítica) o de zonas verdes.

Las UGI rocosas, identificadas y cartografiadas localmente se detallan a continuación:

#### **4.4.1. Roca sedimentaria terrígena, estratiforme y tectonizada (Rstet).**

Son las rocas sedimentarias de textura clástica del Jurásico superior que están expuestas en los taludes de corte para vías y las excavaciones para cimentar los equipamientos deportivos y comunitarios del barrio Bariloche (Figuras 47 a 49).

Consta de areniscas de granos finos y escasos conglomerados, cementados y de baja a moderada resistencia. Con densidad de fracturamiento alto, que la hace muy susceptible a inestabilidad, y escasos saprolitos finos, que por su extensión no cartografiables.

*Figura 46.* Formación Jordán (Jj) muy fracturada, contigua a la manzana N del barrio Bariloche II, sector norte.



Fuente: Autor.

*Figura 48.* UGI de rocas sedimentarias tectonizadas (Rstet) de la Formación Jordán (Jj) detrás de la cancha del barrio Bariloche II. Fecha toma: 7 de abril de 2019.



Fuente: Autor.

*Figura 47.* Formación Jordán (Jj) afectada por sistemas de fracturación dominantes (más largos) y subordinados (irregulares y poco extensos). Se observaron hasta tres familias de diaclasas ortogonales a romboédricas. Abajo se notan unos nódulos caolinífticos, cuyo diámetro centimétrico se compara con una moneda de 200 COP.



Fuente: Autor.

*Figura 49.* Sector con sistemas de fracturación que caracterizan la unidad Rstet, en la vía al Cerro de la Cantera. El marcador se apoya en la superficie de estratificación (E), mientras que su tapa roja toca una de diaclasamiento principal (D1). Formación Girón (Jg).



Fuente: Autor.

#### **4.4.2. Roca sedimentaria terrígena masiva, estratiforme y granulometría fina (Rstef)**

Es la formación superficial o UGI de rocas detríticas o terrígena bien cementada y de granulometría muy fina a fina (lodolitas alternadas con areniscas). Relacionada a sedimentitas del Jurásico, estratiformes y cementadas, de moderada a alta resistencia, con densidad de fracturamiento de bajo a medio, y localmente alto (en el sector norte); su estratificación también es desfavorable, orientada ladera abajo en forma oblicua.

En la Figura 50 se evidencia tal unidad litoestratigráfica, única conformada por rocas propiamente dichas dentro de la zona de estudio.

*Figura 50.* Formación Jordán (Jj) con laminación ubicada detrás del comedor comunal al occidente del barrio Bariloche II. Estas discontinuidades son desfavorables geotécnicamente. Toma del 23 de mayo de 2019.



Fuente: Autor.

Se enuncian ahora los suelos traslocados coluviales. Se agrupan dentro de esta UGS a tres áreas con coluviones relacionados a la exhumación natural y antropizada (colinas desnudas) de las vertientes nororientales del Cerro de la Cantera, que cubren las litologías rocosas del periodo Jurásico se distribuyen en la parte central, nor-central y occidental de la zona de estudio, que son cartografiables a escala 1:600.

Se clasifican según su edad, tipo-cantidad de armazón de gravas, todas típicamente angulares, y su matriz granular (arenas y en menor proporción lodos), así:

#### **4.4.3. Suelo traslocado antiguo (Strca).**

Son los materiales naturales asociados a los Figura 27. Formación Girón con laminación ubicada detrás del comedor comunal al occidente del barrio Bariloche II. Estas discontinuidades son desfavorables geotécnicamente. Toma del 23 de mayo de 2019. depósitos sedimentarios granulares y poco cohesivos, con la mayor edad relativa (antigua) de todos los coluviones localmente identificados. Están al centro y norte de la zona de estudio (Figura 51).

*Figura 51.* Aspecto del suelo traslocado antiguo (Strca), registrado en el vivero ecológico el edén, al norte de la vía que conduce hacia el Cerro de la Cantera. Foto tomada el 6/Julio/2019.



Fuente: Autor.

**4.4.4. Suelo traslocado subreciente (Strcs).** Suelo traslocado subreciente, mezcla de sedimentos heterométricos en matriz fina, en divisorias y laderas onduladas con procesos morfodinámicos activos (erosionados), según la Figura 52. Guarda concordancia con la unidad de depósito del Cuaternario, poco consolidado, en la que dominan los sedimentos terrígenos de grano fino y que localmente son gravosoportado, con guijos hasta bloques rocosos más grandes y muy angulares (integrados por lodolitas, areniscas y conglomerados).

*Figura 52.* Dimensiones y materiales heterogéneos expuestos en cárcava, con gran presencia de guijos dominantes y guijarros angulares, en matriz poco cohesiva anaranjada. Estos son susceptibles a la erosión y contribuyen a la inestabilidad por movimientos en masa ladera abajo.



Fuente: Autor.

#### **4.4.5. Suelo traslocado, en tope de ladera aplanada para cultivos (Strcc).**

Suelo traslocado antropizado (aplanado superficialmente), conformado por sedimentos terrígenos en matriz granular a fina poco consolidada y de pocas gravas, dispersas, distribuido sobre el tope de ladera: equivale a un depósito coluvial que fue limpiado en su almacén o componentes más grandes (es decir, retirando los bloques rocosos), para aplicar cultivos semestrales, como piña (evidenciada en una imagen satelital), hoy día con pastos, arbustos y árboles dispersos (Figura 54).

**4.4.6. Suelo y Roca excavados para estabilización de taludes (SRext).** Se observa en los taludes subverticalizados y bermas denudadas, al norte y oriente: son depósitos detríticos blandos del Cuaternario mal drenados, inconfiados y muy erodables, sujetos a procesos de remoción en masa activos y puntuales. Dicha UGI fue terraceda a tres niveles (Figura 53), cubriendo rocas sedimentarias clásticas del Jurásico, por la reconfiguración y buscando la estabilización del sector afectado por la remoción en masa reciente.

*Figura 54.* Escarpe principal que corresponde al borde de la UGI llamada Strcc; ella limita al norte con de la unidad geomorfológica Laderas cóncavas (Dlc). Foto tomada en 01/Junio/2019.



Fuente: Autor

*Figura 53.* Depósito coluvial reciente (Qcr) observado en la vía norte hacia el Cerro la Cantera, antes de los tanques de agua. Foto tomada en 20/Abril/2019 y suelos traslocados denudados en la parte alta, foto tomada el 13/Junio/2019.



Fuente: Autor.

**4.4.7. Suelo de hábitats urbanos (Shaur).** Son los suelos típicos del hábitat urbano del costado occidental Piedecuesta, en terrenos intervenidos para la construcción viviendas y espacio público. Se involucran materiales heterogéneos, de origen natural local y antrópico, con recebo de areniscas, llenos con bloques-arenas-lodos de remociones en masa y basuras dispersas (Figura 42), mal compactados, no drenados y poco confinados.

*Figura 55.* UGI de suelo de hábitats urbanos (Shaur) con llenos antrópicos y material removido, dispuesto en el talud más inferior. Toma: 25/Mayo/2019.



Fuente:

Autor.



## **5. Caracterización geoambiental: geomorfología, morfometría, geoformas, hidrología superficial, y usos del suelo**

En adelante se describen las unidades morfológicas, tanto cuantitativamente (esto es, morfométricamente y con ayuda de herramientas de geomática, basadas en el ortofotomosaico y el DEM) como cualitativamente obtenida en las labores de campo, fotoidentificación y cartografía fina superficial, con sus atributos y distintos rasgos (véase mapas de pendientes y de elementos geomorfológicos locales, etc.); se abordan, además, los procesos denudacionales o degradacionales, que también se zonificaron mediante herramientas de geomática, en el **Apéndice 1: “Inventario de procesos morfodinámicos locales, y análisis multitemporal con imágenes de sensores remotos de los cambios de uso del suelo y dinámica de los procesos de inestabilidad, cobertura, y uso del suelo”**, se anexa el análisis de sensores multitemporales que comprende el inventario de procesos y la generación del mapa multitemporal de procesos morfodinámicos.

Además, se analiza y enuncia la susceptibilidad a movimientos en masa combinando métodos históricos y heurísticos; para esto último se identificaron, describieron y ponderaron todos los factores contribuyentes (endógenos y exógenos).

### **5.1 Los sistemas naturales y la interacción humana, en contextos urbanos**

Morfológicamente la zona de estudio pertenece a un dominio de Valles y Mesas, en donde afloran rocas del Jurásico al Cretácico (mesas de Ruitoque y los Santos, que se elevan hacia los extremos NW y SE alcanzando altitudes de 1200 y 1600 msnm, respectivamente) cubiertas discordantemente por depósitos del Cuaternario y Antropoceno de distinto origen, geometría y disposición. Estas geoformas y materiales tienen relación con los procesos morfodinámicos, siendo unos de los factores de susceptibilidad y en la amenaza no solo a procesos erosivos sino por

movimientos en masa, más importantes, en el costado occidental del barrio Bariloche II, en área urbana del municipio de Piedecuesta.

La zona estudiada pertenece específicamente a la vertiente noroccidental de la unidad Cerro la Cantera, cuya una unidad morfológica se describe en las páginas sucesivas y sobre la cual operan dichos fenómenos geomorfológicos activos, tanto remociones en masa de distintas tipologías y magnitud, como procesos de erosión pluvial e hídrica, que son sus predecesoras y facilitadoras.

En este subsistema geoesférico, combinado con el atmosférico, hidrosférico y biosférico, está el antroposférico. El hábitat metropolitano, consolidado y de alta expansión urbana, presiona este entorno natural. Así, es indudable que estos “desarrollos humanos” han acelerado los procesos degradacionales o morfodinámicos, cuya evaluación y zonificación son un objetivo específico del presente capítulo.

## **5.2 Dominio Morfogenético**

El ambiente morfogenético local es morfoestructural (S) a denudacional (D), con modelado pluvial-hídrico (P-H), en el cual ocurren escorrentías fluviales o drenajes juveniles, modificados por la hidrología urbana, como parte de la parte alta de la subcuenca media del río de Oro.

Se mencionó que el clima, la hidrología, la geología y las geoformas, junto al uso desfavorable del suelo y las coberturas vegetales, el fuerte y dinámico contexto urbano-metropolitano que presiona con vías, viviendas, líneas vitales y otros equipamientos, han hecho susceptibles estos terrenos ante los procesos de la geodinámica exógena o externa, evidente *de visu*. Así, lo morfoestructural y denudacional dominan sobre lo agradacional (sedimentación), quizás desde el Holoceno. Pero, hoy día, este balance fue acentuado y reactivado por actividades humanas (del denominado Antropoceno), muy desfavorables y que más adelante se evalúan.

Localmente, en la interacción de la geodinámica exógena con la endógena (sismicidad, fallamiento, plegamiento, diaclasamiento, régimen hidrogeológico, litológico, etc.), se presenta también un urbanismo intensivo –por las construcciones, infraestructuras y equipamientos– cuya identificación de factores, cuya interrelación y la ponderación de aportes a la susceptibilidad a movimientos en masa se describe en la respectiva sección.

### **5.3 Clasificación y Jerarquías Geomorfológicas**

La zona de estudio se encuentra, hablando desde lo morfológico y describiéndola jerárquicamente de la macro a meso escala, dentro de la Geomorfoestructura de los Andes Colombianos y en la provincia Cordillera Oriental, en la zona de Valles al sur del AMB. Específicamente pertenece al noroccidente urbano de Piedecuesta, urbanizado en las vertientes del Cerro de la Cantera: tal subdivisión se enuncia en los sucesivos párrafos e ilustra en las Figuras 35 a 38. Así, este cerro rocoso subredondeado es una unidad geomorfológica que en planta es un elipsoide, con orientación NWW-SEE, irregular y con forma de ameba que resalta desde los 1000 msnm (Figura 39) visto desde el centro antiguo urbano, el cual en su mayoría centro-oriental se fundó sobre flujos detríticos desde el piedemonte cordillerano y en abanicos aluviales y/o aluvio-torrenciales del río de Oro. La metodología de clasificación fue adaptada de la propuesta de niveles y denominaciones de geoformas originalmente propuesta por H. Carvajal y que fue oficializada a través del SGC (2012).

### **5.4. Morfología y Morfometría**

El área de estudio abarca 46,887 m<sup>2</sup>, que cubren la zona de ladera identificada en la Figura 1, en un tramo de vertiente altitudinalmente limitado entre 987 y 1048 msnm, aproximadamente.

Figura 57. Unidades Geomorfológicas definidas jerárquicamente en la zona de estudio.



Fuente: Modificado de SGC (2012).

Figura 58. Unidad Geomorfológica Cerro la Cantera, flanco norte. Toma al occidente desde las canchas del barrio Bariloche II.



Fuente: Autor.

*Figura 59.* Vista hacia el sur, del costado norte, de la subunidad ladera antropizada (terraceada a tres niveles). El vehículo está sobre la berma más inferior, la persona sobre la intermedia; a la izquierda está la manzana P.



Fuente: Autor.

*Figura 60.* Base del talud terraceada al costado norte con una vista hacia el sur.



Fuente: Autor.

Para la caracterización morfométrica se usaron las bases topográficas disponibles (AMB, 2016), el ortofotomosaico actualizado y complementado por el presente autor (que mejoró los adquiridos, procesados y editados previamente), y las medidas de pendiente con clinómetro, de longitud con decámetro, altitudes y coordenadas con GPS, orientación de superficies con brújula y forma de

*Figura 61.* Imagen en planta de la denominada Unidad Geomorfológica Cerro de la Cantera. Se eleva en el borde occidental urbano, a partir de los 1000 msnm, con una geometría elipsoidal irregular, de tope redondeado y laderas semiconvexas a cóncavas, muy intervenidas por el urbanismo. La zona de estudio está delimitada por las vías en color blanco: al centro-norte de acceso al tope del cerro, la cual pasa por los dos tanques del acueducto, y a la derecha entre las calles 2 y 6. Las sombras, de tonos grises más oscuros y mayores pendientes, se correlacionan con los sistemas de fallas reconocidos.



Fuente: Google My Maps (2019).

laderas, etc.). En la Figura 62 se presenta el sistema de clasificación aquí usado, con el autor y las categorías de pendientes para la zona de estudio.

El Mapa 2 de Pendientes se generó a escala 1:800 exportando la base topográfica .DWG al ArcGIS, obteniéndose un MDT y luego con la herramienta *Slope*: este mapa plasma la zonificación de las pendientes en porcentajes y según estos siete rangos.

Figura 62. Rangos de pendientes o gradientes usados, con su cualificación.

GRADIENTE (%)	DESCRIPCIÓN
0-3	Plano
3-7	Ligeramente inclinado
7-12	Moderadamente inclinado
12-25	Fuertemente inclinado
25-50	Ligeramente escarpado
50-75	Moderadamente escarpado
> 75	Fuertemente escarpado

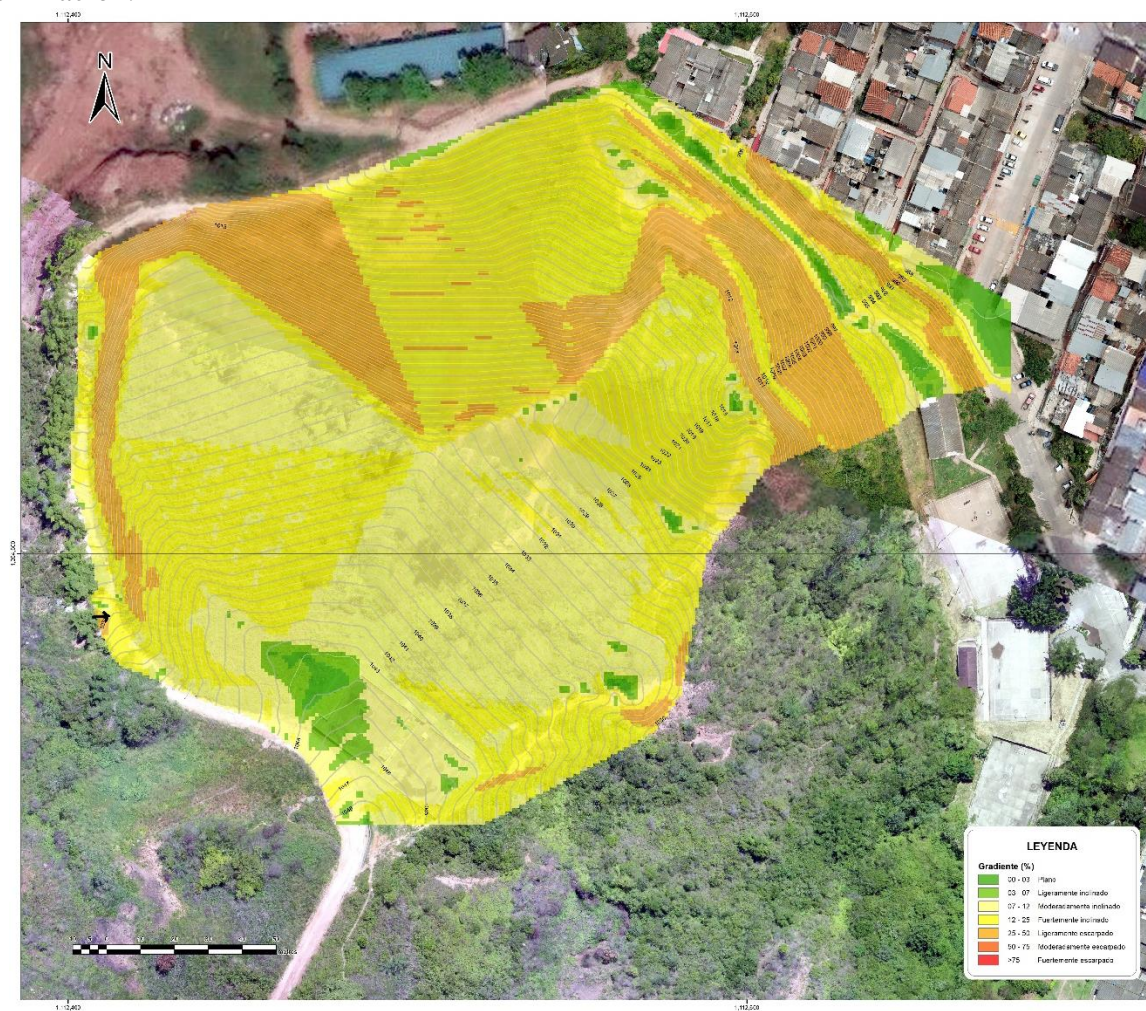
Fuente: Instituto Colombiano de la Reforma Agraria (1995).

La geometría general de los terrenos evaluados es ondulosa convexa, que corresponden a la esquina nororiental exhumada del Cerro de la Cantera, puntualmente con laderas más cóncavas que semi-convexas, como se dijo reflejan no solo la interacción de los procesos endógenos y los agentes morfológicos, sino los climatológicos, hidrológicos y bióticos que conducen a la meteorización, erosión y movimientos en masa; junto a la actividad humana han operado desde el Antropoceno sobre las unidades de rocas estratiformes cubiertas localmente por depósitos traslocados (coluviales y de remociones en masa), e incluso llenos: las laderas son en su mayoría cortas y luego medias, de relieves dominantes fuertemente inclinados (pendientes de 12% a 25%) y ligeramente escarpados (entre 25% y 50%), seguidos por algunos taludes moderadamente (50% a 75%) a fuertemente escarpados (>75%), y en menor porcentaje ligeramente inclinados a totalmente planos, según la Figura 63.

También se deduce que del área total de estas vertientes (Figura 64), ha sido objeto de acciones antrópicas dominantes, para construir vías, viviendas, andenes y otros espacios públicos,

infraestructuras (tanques), equipamientos (canchas, caseta comunal, etc.), talando bosque y adaptando los coluviones (retirando sedimentos rocosos tamaño bloque) para cultivos limpios.

*Figura 63.* Mapa de pendientes local generado en SIG, coloreado según los anteriores rangos y su denominación.



Fuente: Autor.

Las figuras sucesivas representan evidencias de rasgos y atributos morfológicos identificados en campo y con sensores remotos.

Figura 64. Vistas cenitales que detallan la variación vial hacia sobre la base de la ladera, en sentido sur, contiguas al actual vivero. La acometida sobre el cerro se calcula de 190 metros de acuerdo a las imágenes multitemporales de dominio público, disponibles en Google Earth.



Fuente: a) Septiembre 2002; b) Julio 2005; c) Diciembre 2014.

Es clara la evolución geométrica de la vía hacia el cerro y las medidas de control de inestabilidades por el evento de febrero del año 2013, produjeron sucesivos taludes de corte al norte, excavaciones y terracedos sobre la vertiente oriental, en 3 niveles (Figuras 65, 66 y 67), respectivamente.

*Figura 65.* Vista del terracedo efectuado para la estabilización de un sector la ladera oriental del área de estudio, cortados durante el año 2014.



Fuente: Autor.

*Figura 66.* Estado actual de la parte central de la berma más alta (nivel 3) del sector terracedo por los movimientos en masa del 2013. Aún se requiere manejar y mitigar los procesos erosivos.



Fuente: Autor.

*Figura 67.* Vista al norte desde la berma de la terraza inferior, frente al costado occidental de las manzanas, y de los taludes de las terrazas 2 y 3.



Fuente: Autor.

Geométricamente las laderas son cortas, arriba planas y abajo cóncavas a semiconvexas, ello en respuesta a la presencia de estratos rocosos dominantes cubiertos localmente por coluviones de poco espesor, que suavizan la superficie, y a los movimientos en masa recientes. Éstas ya han sido terraceadas mediante cortes por el urbanismo y luego como acciones de estabilización (incompletas), produciendo afloramientos litológicos e incrementos de la pendiente.

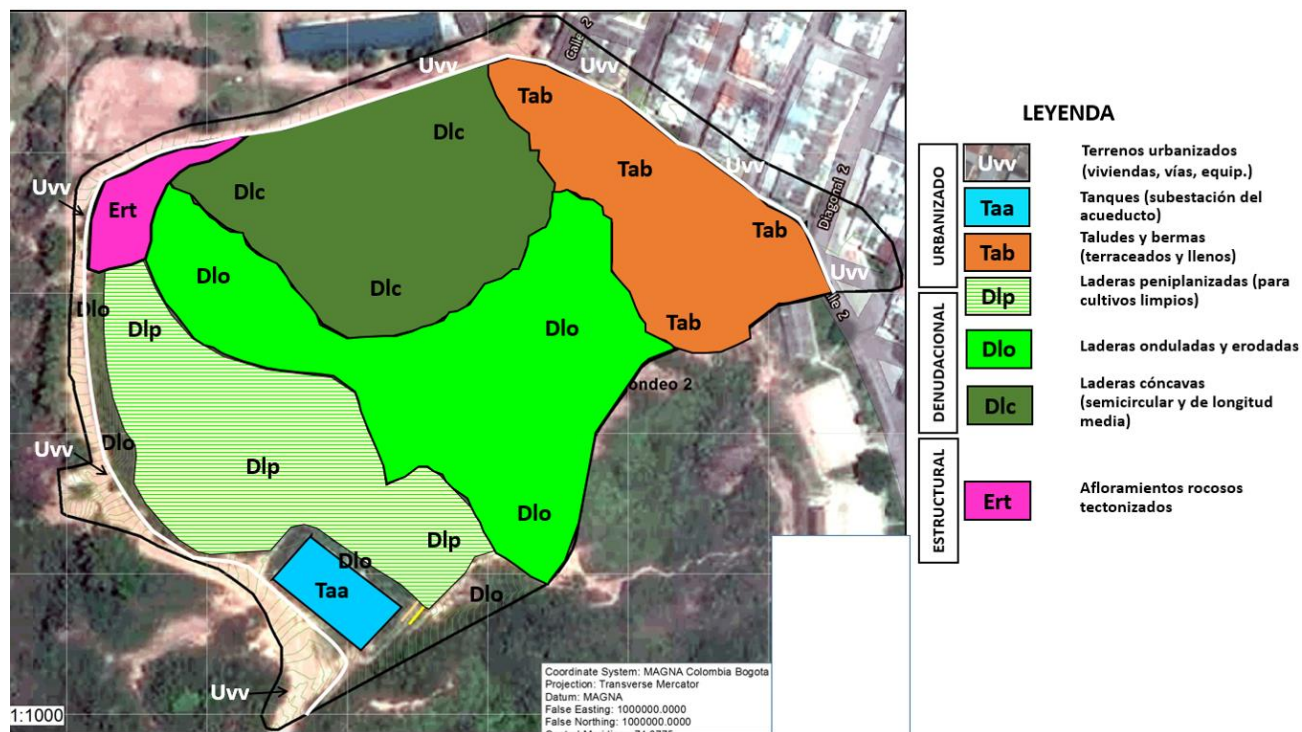
La degradación o denudación es un proceso geodinámico exógeno importante (hacia abajo, bajo la influencia de la fuerza gravitacional), en contraposición a la agradación (que crea relieve, orientada radialmente, o hacia arriba), pero muy acelerado por el uso del suelo (potrerización, urbanismo, las infraestructuras y los equipamientos en la zona de estudio), considerando además que estamos en el área metropolitana de Bucaramanga.

### **5.5. Mapa de Unidades Locales y Elementos Geomorfológicos**

En la presente sección se utilizó la “Guía metodológica 1 de la incorporación de la prevención y la reducción de riesgos en los procesos de ordenamiento territorial” (MAVDT, 2005), para la nomenclatura de las unidades morfológicas o elementos de paisaje a nivel local.

En general existen siete tipologías (ver Figura 68), agrupadas en tres categorías de acuerdo a su origen: morfoestructural; denudacional; y terrenos de hábitats urbanos.

Figura 68. Zonificación de unidades geomorfológicas locales (ver en anexos el Mapa 4).



Fuente: Autor.

Cada una de ellas se describe y registra fotográficamente como sigue.

**5.5.1. Unidades de origen urbano (U)** Corresponden a las zonas en las que se generó una modificación del terreno, en el contexto del desarrolla urbano propiamente dicho, modificando la morfología original. Contiene tres categorías directas y una combinada; es decir, estas 4 subunidades: Uvv, Taa, Tab y Dlp.

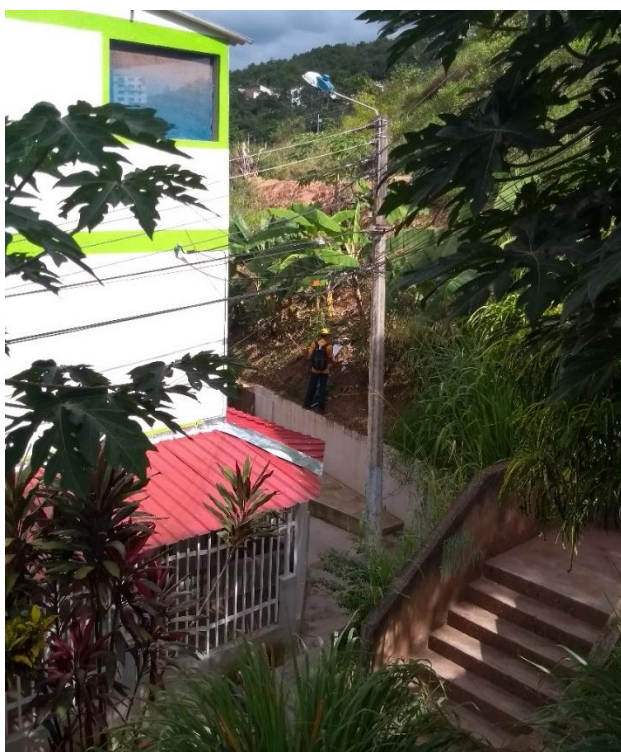
- **Subunidad Terrenos Urbanizados (Uvv):** son los terrenos específicamente destinados para viviendas, con densidad baja; fueron intervenidos mediante descapotes y explanaciones, taludes de corte y/o llenos, para crear los pisos de cimentación directa de viviendas (Figuras 69 y 70).

*Figura 69.* Unidades relacionadas al urbanismo, manzanas N, O y L, de izquierda a derecha, en la base de la ladera excavada del cerro estudiado.



Fuente: Autor.

*Figura 70.* Casa esquinera de la manzana N ubicada a pocos metros de la base de la ladera de excavada del cerro de estudio.



Fuente: Autor.

Supuso también, en la base de las laderas del cerro, la tala y el retiro de coberturas vegetales, algunas de gran porte y primarias, con lo cual hoy son en su mayoría secundarias, así como la voladura y/o excavación mecánica de rocas, suelos y depósitos sedimentarios para subrasantes de vías, los espacios públicos con superficies duras, zonas verdes, otras infraestructuras y equipamientos.

- **Subunidad Tanques del Acueducto (Taa):** Están a cargo de la Piedecuestana ESP SA, construidos al tope de la ladera superior del costado occidental del barrio Bariloche II (Figura 71, señalado en el óvalo fucsia). Según testimonios de la comunidad, y revisión de documentos suministrados, el primero de ellos fue construido en 1992 y el segundo 2007, de izquierda a derecha en la foto.

*Figura 71.* Panorámica desde la vía de acceso por el norte al Cerro de la Cantera. Se observan las subunidades de laderas peniplanizadas (**Dlp**), contiguas a los dos tanques (subunidad **Taa**) del acueducto.



Fuente: Autor.

- **Subunidad Taludes y bermas (Tab):** Suelos de geometrías y con estructuras modeladas en tierra, frente al borde suroccidental de las manzanas L, O, N y P (Figuras 72 y 73).

*Figura 72.* Drenaje sobre canaleta ubicado en la esquina suroccidental de la zona de estudio sobre la berma 1 terraceada.



Fuente: Autor.

*Figura 73.* Sector contiguo a la foto anterior, al sur de la zona desestabilizada (vegetada al centro e izquierda) en febrero de 2013. Nótese el primer nivel de la terraza y el flujo de agua en la cuneta interna.



Fuente: Autor.

### 5.5.2. Unidades de origen denudacional (D)

- **Laderas peniplanizadas (Dlp):**

*Figura 74.* Laderas peniplanizadas en las que se observan cultivos de piña sembrados posteriormente al evento del 2013 en el sector SW del Cerro la Cantera. Fecha de imagen: 25/Julio/2014.



Fuente: Google Earth.

- **Laderas onduladas y erodadas (Dlo):**

*Figura 75.* Vista hacia el Cerro la Cantera (con virgen al fondo) de laderas onduladas y erodadas (excavadas en este caso). Fecha de toma: 20/Abril/2019.



Fuente: Autor.

- **Laderas cóncavas**

Son comunes al norte de la zona de estudio, e ilustradas en las figuras desde la 76 hasta la 79.

*Figura 76.* Vista al noroccidente del elemento morfológico laderas cóncavas (Dlc).



Fuente: Autor.

*Figura 77.* Berma 3 con vista hacia el norte.



Fuente: Autor.

*Figura 78.* Vista hacia el sur, berma 3.



Fuente: Autor.

*Figura 79.* Tope de las bermas.



Fuente: Autor.

**5.5.3. Unidades de origen morfoestructural (E)** Poseen una génesis geológica (endógena), debido a su génesis sedimentaria y evolución sismotectónica, con la orogénesis andina, los rasgos estructurales regionales y locales condicionantes, tales como fallas, pliegues, etc., y la exhumación y modelado posterior.

- **Afloramientos rocosos tectonizados (Ert):**

*Figura 80.* Areniscas de la Formación Girón, dentro de la geoforma de origen estructural, de rocas tectonizadas (Ert).



Fuente: AMB y Consorcio Geoingeniería (2016).

## **5.6. Hidrología Superficial**

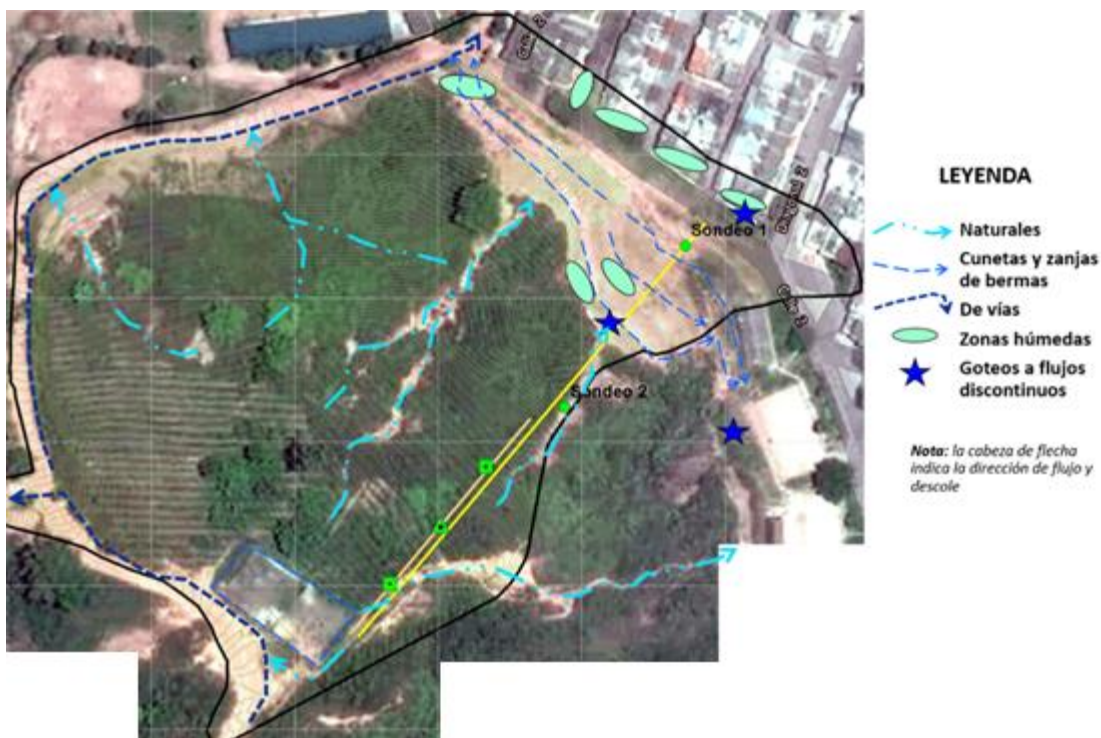
Se presenta a continuación la cartografía de las manifestaciones de agua superficial y subsuperficial según la Figura 81 registradas en los trabajos de campo, con apoyo de sensores remotos y controles con GPS Garmin.

No es objetivo de la presente tesis hacer una evaluación hidrológica e hidráulica detallada; por el contrario, se analiza la hidrografía que tiene incidencia e importante aporte para la modificación

del estado tenso-deformativo de los materiales geológicos, siendo un factor contribuyente exógeno para la susceptibilidad a movimientos en masa.

Se definieron las siguientes categorías y geometrías de elementos hidrográficos, en su mayoría influenciados por el urbanismo: drenajes naturales; cunetas y zanjas de bermas, con descoles y algunas alcantarillas; escorrentías que siguen o no cunetas de vías, con pocas alcantarillas; zonas húmedas dispersas; goteos a flujos discontinuos puntuales.

Figura 81. Mapa de hidrología local de la zona de estudio



Fuente: Autor.

Para las tres primeras categorías, en la cartografía presentada en el Mapa 9, se indica además una línea con distintas geometrías de trazos, y una cabeza de flecha que indica la dirección de flujo y descole superficial.

*Figura 82.* Arriba cuneta y dissipador al frente. Costado sur, detrás de la caseta comunal. Foto tomada el 1/Junio/2019.



Fuente: Autor.

*Figura 83 y Figura 84.* Cuneta derruída (sin bordillos), con flujo hacia la persona, al sur (imagen izquierda) y detalle de la misma cuneta, en su inicio canalizado, vista hacia el NW (imagen derecha). Foto tomada en 01/Junio/2019.



Fuente: Autor.

*Figura 85.* Berma superior vegetada, en la que se indica la salida del drenaje q viene desde los tanques.



Fuente: Autor.

*Figura 86.* Empozamiento de aguas (o zona húmeda) en la cuneta de la berma, cerca al sitio de foto anterior. Foto tomada en 25/Mayo/2019.



Fuente: Autor.

*Figura 87.* Drenaje natural, con flujos de aguas estacional (intermitente) presente hacia la cabecera del escarpe formado por el evento de 2013 ubicado al nororiente de la zona de estudio.



Fuente: Autor.

*Figura 88.* Surcos en el extremo norte, con flujo libre de aguas drenadas sobre el talud terraceado. Foto tomada en 25/Mayo/2019.



Fuente: Autor.

*Figura 89.* Rocas de la Formación Girón (Jg), cuyas discontinuidades facilitan la infiltración y el flujo superficial laminar. Foto tomada en 07/Abril/2019.



Fuente: Autor.

*Figura 90.* Drenaje efímero presente en cárcava aguas abajo a aproximadamente 80mts presente al suroriente de los tanques de agua ubicados en el Cerro La Cantera actuando como un canal natural para el escurrimiento de aguas.



Fuente: Autor.

*Figura 91.* Drenaje efímero presente en bifurcación de cárcava aguas abajo a aproximadamente 80mts al suroriente de los tanques de agua ubicados en el Cerro La Cantera, actuando como canal natural.



Fuente: Autor.

*Figura 92.* Humedad en zócalos en la casa 12 de la manzana L en el barrio Bariloche II. Imagen tomada en 29/Mayo/2019.



Fuente: Autor.

*Figura 93.* Humedades presentes en el muro de la base del talud, a la derecha de la casa 10 en la manzana L del barrio Bariloche II. Foto tomada en 07/Abril/2019.



Fuente: Autor.

*Figura 94.* Detalle de la zona con goteos de aguas, en la pata del muro, cerca de la libreta (al centro). Foto tomada en 23/Mayo/2019.



Fuente: Autor.

*Figura 95.* Mampostería de escaleras y confinamiento de zonas verdes, deterioradas por la humedad y falta de mantenimiento. Foto tomada el 25 de mayo de 2019.



Fuente: Autor.

*Figura 96.* Humedades en el zócalo de la casa 7 en la Manzana O del barrio Bariloche II. Foto tomada en 01/Junio/2019.



Fuente: Autor.

### **5.7. Coberturas Vegetales y Usos del Suelo**

Además de su función de protección directa del suelo y la contribución en la estabilidad de taludes la vegetación posee un gran valor como oferta ambiental: han tenido un rol en el contexto histórico, urbano y cultural de Piedecuesta, con sus recursos tanto forestales como agrícolas. Pero esto no fue sostenible: muchas especies vegetales en el cerro de la Virgen de la Cantera debieron haber sido afectadas seriamente en su aspecto nativo, por lo que se perdió su valor hedónico y ecológico, con la regulación del sistema aire-vegetación-suelo-agua, y contribuyendo al deterioro de las unidades de paisaje (geosistemas), la reducción de la flora y fauna nativas: estas laderas, o vertientes, actualmente ofrecen un paisaje desolador, visualmente no agradable.

Se efectuaron controles de campo para identificar las unidades y asociaciones vegetales, con los usos de manera básica y sin llevar a profundizar. Se generó un mapa con la fotoidentificación del desarrollo de la vía (que en el extremo más norte del área estudiada fue excavada hacia el sur, aumentando la altura de los taludes de corte rocosos, en tres etapas progresivas) y también del urbanismo: para explicar la base de las laderas al norte y del costado occidental de las manzanas del barrio en cuestión), de los usos del suelo y el manejo de la vegetación natural (primaria y secundaria), con cultivos limpios y la construcción de dos tanques para el acueducto en la parte alta de la geofoma evaluada. Todos ellos como acciones humanas desfavorables, junto a la praderización (talas y quemas) y el terraceo con maquinaria pesada, para el descargue y aplicación de obras biotécnicas sobre la zona desestabilizada en febrero del 2013.

Se compararon imágenes satelitales, especialmente de Google Earth de los años 2014 (julio) y de 2018 (febrero), junto al ortofotomosaico adquirido y generado por el maestrando de mayo de 2019. Se cortó la vegetación arbustiva natural y de pastos secundarios para cultivar piña (evidente

desde finales del 2013 hasta el mes de julio de 2014, y se ejecutaron excavaciones y la fundación de dos tanques de agua –tal y como ya se describió en el ítem de hidrología–.

Las siete unidades de coberturas y usos que se describen son: a) Zonas denudadas; b) Árboles dispersos; c) Rastrojos altos; d) Pastos altos; e) Parcelas y vivero (cultivos semestrales y/o de pancoger); f) Zonas verdes y antejardines; e) Áreas con Urbanismo (no bióticas).

Las zonas erosionadas o denudadas (las cuales carecen de suelo-vegetación) ya fueron descritas en la sección de procesos morfodinámico: son activas y tienen predominio de erosión hídrica concentrada (surcos y cárcavas y algunas hondonadas) a laminar-difusa. Ellas se han generado debido a los flujos de aguas superficiales y estacionales (presentadas en las épocas lluviosas, del régimen de precipitación bimodal) que producen importantes escorrentías sobre los coluviones, con arranque, lavado y acarreo de materiales finos a granulares poco cohesivos. No obstante, se han generado históricamente escurrimientos no solo por estas aguas lluvias sino por las provenientes más arriba que se concentraban sobre la vía destapada, y sobre todo las de los dos tanques de la PDS.

La fuente de estas aguas fueron los orificios superiores y del costado oriental de cada tanque (como desagües o aliviaderos, debido a la falta de control o mantenimiento de los flotadores), que fluyeron libre y naturalmente ladera abajo, con mayor caudal en las horas de la noche y que incluso inundaban varias casas, según los testimonios que dieron varios de los residentes de las casas - frente a la pata del talud, más abajo de los citados tanques-. Tales aguas superficiales provenientes de los tanques del acueducto solo fueron tratadas ingenierilmente hasta antes de inicios del año 2013, con la construcción de una cuneta perimetral, de una tubería de conducción y que, al parecer, descolaba directamente a media ladera. Evidencia de ello es mostrada en las fotografías de la sección de procesos geomorfológicos.

*Figura 97.* Sector denudado, con procesos de erosión pluvial y principalmente hídrica, dentro de la unidad geomorfológica Dlo. A varias decenas de metros al suroccidente de la zona de estudio, costado oriental de la vía al monumento a la Virgen de la Cantera (vista en el centro, al fondo).



Fuente: Autor.

Los árboles dispersos y los rastrojos altos (Figura 98) son unidades vegetales de tipo secundario, en una vertiente que fue históricamente intervenida para explotar madera para fines de construcción (como techos de viviendas coloniales, postes de cercamientos o como leña), junto a cultivos semestrales.

En todo el sector de influencia solo es notoria la buena cobertura vegetal existente en inmediaciones del polideportivo los Tigres (Figura 99).

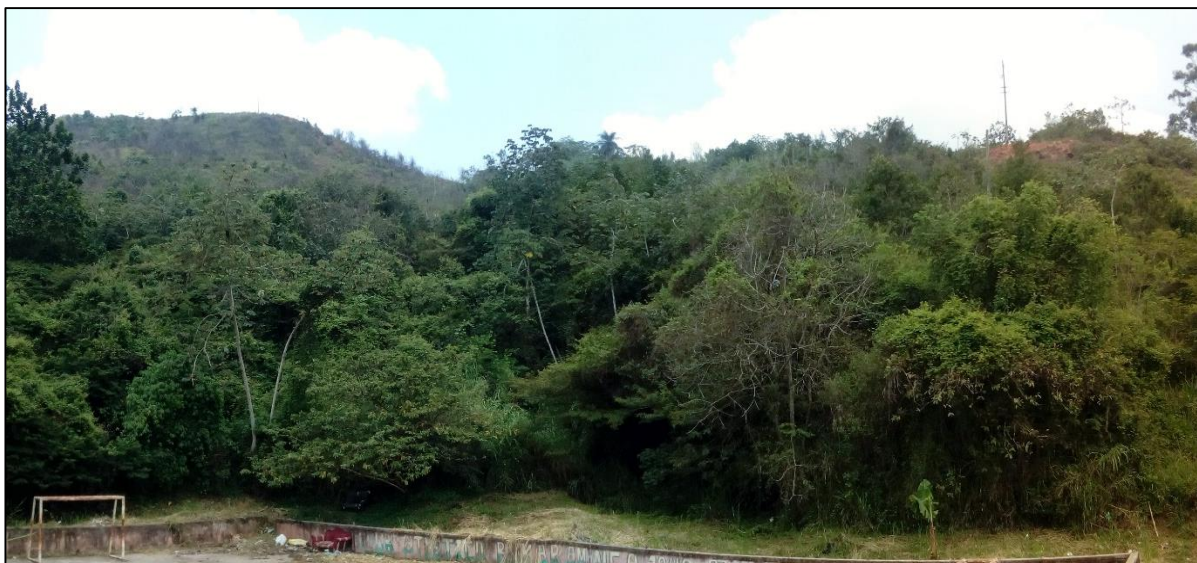
De las gramíneas, tanto naturales y que en menor cantidad son rastreros (Figura 100), predominan los altos (pasto elefante), que ya fueron bien registradas en las fotografías de los capítulos de geología y geomorfología. Varias áreas con pastos se relación principalmente a las obras bioingenieriles ejecutadas entre agosto y septiembre de 2015 sobre los taludes de las tres terrazas de abajo, como se relata más adelante, y que aún se mantienen densas (Figura 101) y acompañadas de guaduales.

*Figura 98.* Un aspecto del rastrojo alto, la unidad verde más dominantemente localmente, que puede ser disperso a denso. Esta vegetación es importante porque cubre a la zona de coluviones, de la acción de la lluvia y la erosión. Posee arbustos bajos, helechos y otras especies.



Fuente: Autor.

*Figura 99.* Bosque secundario bien conservado, al extremo sur de la zona de estudio. Contiguo a la cancha suroccidental de la etapa II del barrio Bariloche.



Fuente: Autor.

*Figura 100.* Pastos rastreros y altos, vistos en el comedor comunal. Toma del costado suroriental.



Fuente: Autor.

*Figura 101.* Pastos altos, plantados y con densidad, siendo efectivos para la protección y estabilidad de suelos. Varios de los trinchos en bambú, instalados en tramos horizontales, luego se establecieron y desarrollaron como plantas (subfamilia poáceas), arriba izquierda.



Fuente: Autor.

También fue cartografiado y generado una unidad de cobertura para un sector en donde se fotoidentificaron surcos de cultivos de piña, hoy día inactivos: ocurrieron en el tope más o menos plano de la ladera en consideración, circundando la zona con cerramiento de la PDS.

Hacia el costado norte hay un vivero que lleva varios años en la zona estudiada, con cultivos de pan coger (yuca, plátano, limones, etc.) y plantas ornamentales para la venta (Figura 102)

*Figura 102.* Vivero ecológico Belén.



Fuente: Autor.

Otra unidad de cobertura, pero con la menor distribución local, se relaciona a las zonas verdes (Figura 113) y los antejardines: las primeras poseen algunos frutales (mangos, papayos, cítricos), herbáceas perennes gigantes (plátano), suculentas (yuca) y árboles de tamaño medio (de uso

múltiple, como el matarratón, Figura 114); la segunda posee especies ornamentales y aromáticas, en materas o directamente plantadas en tierra.

*Figura 103 y Figura 104.* Izquierda, Zonas Verdes contigua a la manzana P, plantada con cultivos de pan coger; derecha, posee matarratón, cítricos y ornamentales.

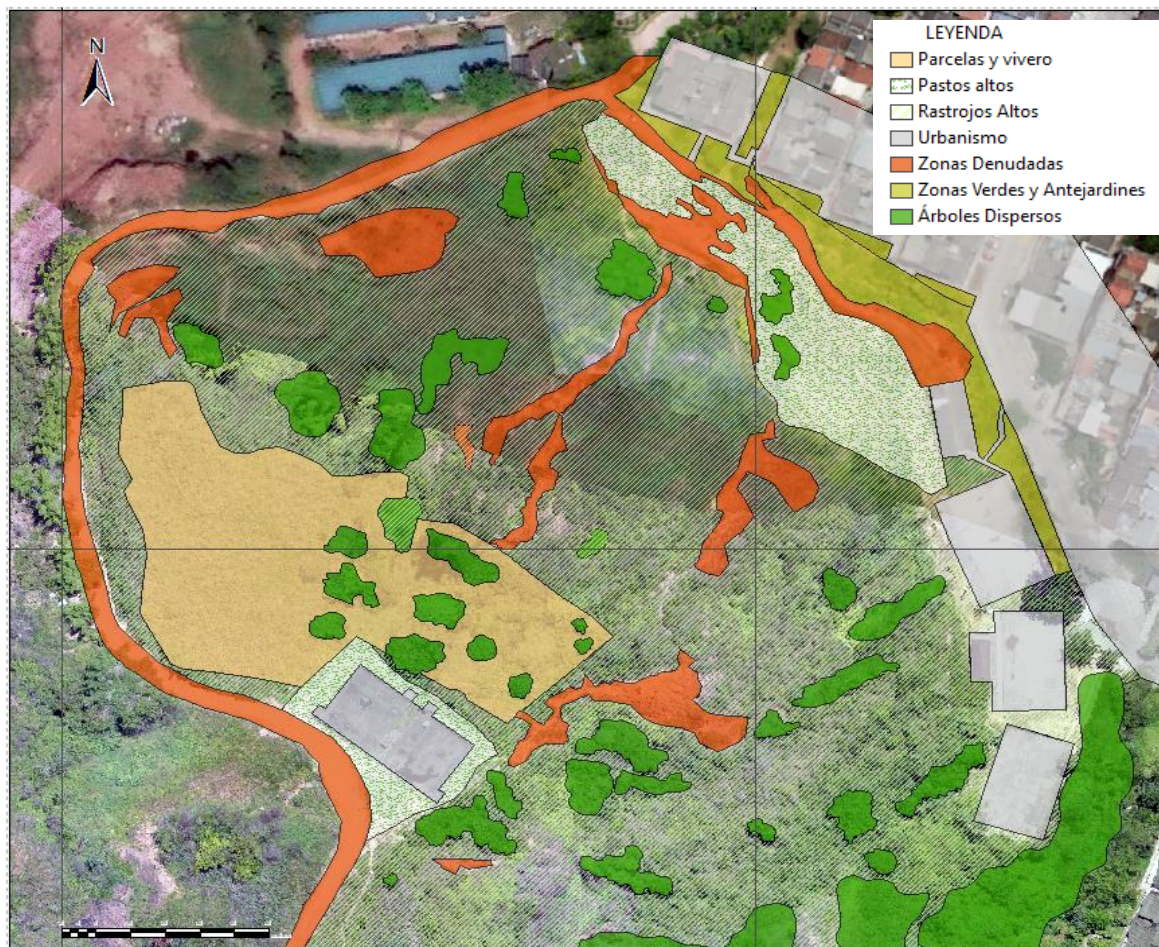


Fuente: Autor.

Finalmente, están también reconocidas y digitalizadas unas pequeñas áreas duras por el Urbanismo (con vías, andenes, canchas, caseta comunal y las viviendas).

En el **Anexo 7** a escala 1:600, y en la Figura 115 aparecen señaladas las unidades vegetales caracterizadas.

Figura 105. Mapa de coberturas vegetales y usos del suelo.



Fuente: Autor.

El trazado de estas unidades de cobertura fue cualitativo, producto de la inspección visual en campo y no se usó la metodología Corine Land Cover (CLC, 2018), por estar fuera de los alcances y formación del estudiante de maestría en geotecnia. También se destacan los incendios forestales registrados, que además de destruir a las plantas hacen perder propiedades físico-mecánicas (humedad natural, consistencia, cohesión, etc.), destruyen los sistemas radiculares de árboles, arbustos y gramíneas, aumentan la meteorización física (por disgregación y desintegración de la matriz de coluviones y de los escasos suelos residuales fino-granulares) haciendo también vulnerable el sistema natural a los procesos de erosión pluvial, hídrica y a remociones en masa.

## **6. Zonificación de la susceptibilidad geomorfológica**

El análisis de susceptibilidad por movimientos en masa puede considerarse el primer paso para la zonificación de la amenaza y evaluación de riesgo (SGC, 2017). Un mapa de susceptibilidad contiene información sobre los tipos de movimientos en masa, áreas más probables para su ocurrencia e incluso áreas posiblemente afectadas. En estudios a escala media y zonas donde no existe suficiente información sobre la temporalidad de los movimientos en masa, el mapa de susceptibilidad puede considerarse en sí mismo un producto final que puede usarse directamente en la planificación territorial.

Existen diferentes métodos para el análisis de susceptibilidad por movimientos en masa, cuya aplicación depende de aspectos tales como el tipo de movimiento en masa, el tamaño del área de estudio, la información disponible, la escala de análisis y el conocimiento de los expertos que ejecutan los estudios. (SGC, 2017).

Cabe recordar, conforme a los objetivos y alcances de la tesis, que en esta investigación aplicada no se efectúa un análisis de Lluvias o Sismos Detonantes.

### **6.1. Cartografía Detallada de la Susceptibilidad Geomorfológica**

Esta se evaluó mediante la herramienta algebra de mapas del ArcGIS, ponderada de 1 (muy baja) a 5 (muy alta), conforme se muestra en el Anexo 12 (plasmado en la Figura 170). Las variables definidas para el análisis de susceptibilidad, que corresponden a los factores contribuyentes (endógenos y exógenos) que fueron priorizadas, caracterizadas, zonificadas, y ponderizadas, y su peso y multiplicador asignado fueron las siguientes seis:

#### **6.1.1. Geología**

Para esta variable se consideraron los siguientes tres aspectos:

a) Espesor

Este componente se califica heurísticamente en función del espesor estimado de las unidades litológicas considerando los afloramientos evaluados en las diferentes estaciones geológicas y la cartografía básica.

b) Meteorización.

La meteorización es la desintegración o descomposición de los materiales geológicos en superficie (González et al., 2002). Es un fenómeno geodinámico exógeno, que hace parte del ciclo sedimentario, que remueve, desintegra, descompone, transforma y reduce las rocas y minerales corticales, cuyo producto final son los suelos, que pueden permanecer progresiva y directamente sobre la roca madre (en contacto neto o gradual, llamados suelos residuales o in situ) debido a factores físico-mecánicos, químicos y bióticos, o que pueden ser transportados como sedimentos (siendo denominados suelos transportados: aluviales, eólicos, glaciares, etc.); ella facilita o predispone a la acción de otros agentes y procesos morfodinámicos (erosivos, de movimientos en masa), que si conllevan a la denudación directa y la pérdida de relieve, con lo cual es un fenómeno externo que se involucra indirectamente en la génesis de las inestabilidades globales del terreno (Reyes, 2018).

Este aspecto es muy importante porque se correlaciona además con las propiedades físicas y mecánicas de las rocas y suelos. Una estimación aproximada y clasificación de la resistencia (a compresión simple) de suelos y rocas, medida con índices litológicos de campo y su estado de meteorización, es ofrecida por el ISRM (1981; en González et al., 2002): son siete clases para suelo (desde S1 hasta S6, incluyendo a Ro, o roca

extremadamente blanda); y cinco para roca (desde R1 hasta R5, con roca muy blanda a muy dura, respectivamente).

El factor ponderador para cuantificar el aporte a la susceptibilidad de la meteorización de cada una de las unidades litológicas se asignó en base a la siguiente calificación heurística:

Tabla 4. *Factores multiplicadores para ponderación del factor contribuyente meteorización en el cálculo de la susceptibilidad por el componente geológico.*

<b>FM METEORIZACIÓN</b>	
<b>Alta</b>	3.41 a 5.00
<b>Moderada</b>	1.71 a 3.40
<b>Baja</b>	0.00 a 1.70

Fuente: Autor

c) Estructura.

El factor ponderador para cuantificar el aporte a la susceptibilidad de la estructura de cada una de las unidades litológicas se asignó en base a la siguiente calificación heurística:

Tabla 5. *Factores multiplicadores para ponderación del factor contribuyente meteorización en el cálculo de la susceptibilidad por el componente geológico.*

<b>FM ESTRUCTURA</b>	
<b>Masiva</b>	1
<b>Estratificada</b>	2
<b>Laminada</b>	4
<b>Irregular</b>	5

Fuente: Autor

A continuación, se presenta el consolidado con los factores de ponderación y el resultado de la calificación de susceptibilidad heurística para el componente geológico:

Tabla 6.

*Ponderación definitiva de la susceptibilidad por el componente geológico.*

Nomenclatura	Espesor (m)	FM ESP	Meteorización	FM MET	Estructura	FM EST	Susceptibilidad Factor Geológico
Qllen	0.5 - 2.5	3.50	Alta	4.70	NE	5.00	4.40
Qcr	1.5 - 3.2	5.00	Moderada a alta	3.60	NE	4.50	4.37
Qca	0.7 - 4.2	3.00	Moderada a alta	3.30	NE	4.00	3.43
Qdt	1.8 - 3.7	4.00	Moderada a baja	1.80	Mixto	2.50	2.77
Jj	>26	1.00	Moderada	2.70	Laminada a Estratificada	3.50	2.40
Jg	>20	1.00	Moderada a baja	1.60	Masiva a Estratificada	1.50	1.37

Fuente: Autor

En la Figura 106 se muestra cartografiada la susceptibilidad por este componente.

**6.1.2. Pendiente.** Este componente geomorfológico se ponderó en forma equitativa en los distintos rangos de pendiente conforme a la clasificación definida en la Figura 62. El criterio es el siguiente:

Tabla 7.

*Ponderación definitiva de la susceptibilidad acorde a la pendiente del terreno.*

Gradiente (%)	Descripción	Susceptibilidad Factor Pendiente
00-03	Plano	0.70
03-07	Ligeramente inclinado	1.40
07-12	Moderadamente inclinado	2.10
12-25	Fuertemente inclinado	2.90
25-50	Ligeramente escarpado	3.60
50-75	Moderadamente escarpado	4.30
>75	Fuertemente escarpado	5.00

Fuente: Autor

En la Figura 107 se muestra cartografiada la susceptibilidad por este componente.

**6.1.3. Geomorfología** Para la ponderación del componente geomorfológico se asignó a cada unidad un factor multiplicador de forma heurística acorde a las características descritas en 4.5 *Mapa de Unidades locales y elementos geomorfológicos*.

Tabla 8.

*Ponderación definitiva de la susceptibilidad por el factor geomorfológico.*

<b>Nomenclatura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Susceptibilidad</b>
Dlo	Laderas onduladas y erodadas	4.80
Tab	Taludes y bermas (terraceados y llenos)	4.50
Dlc	Laderas cóncavas (semicircular y de longitud media)	3.60
Dlp	Laderas peniplanizadas (para cultivos limpios)	3.00
Taa	Tanques (subestación del acueducto)	2.70
Uvv	Terrenos urbanizados (viviendas, vías, equipo)	2.20
Ert	Afloramientos rocosos tectonizados	1.70

Fuente: Autor

En la Figura 108 se muestra cartografiada la susceptibilidad por este componente.

**6.1.4. Cobertura y ocupación del suelo** Para la ponderación del componente de coberturas y uso del suelo se asignó a cada unidad un factor multiplicador de forma heurística acorde a las características descritas en 4.7 *Coberturas vegetales y usos del suelo*.

Tabla 9.

*Ponderación definitiva de la susceptibilidad por el factor de coberturas y ocupación del suelo.*

<b>Descripción</b>	<b>Susceptibilidad</b>
Zonas denudadas	5.00
Rastrojos altos	4.70
Pastos altos	4.50
Zonas verdes y antejardines	4.20
Parcelas y vivero (cultivos semestrales y/o de pancoger)	3.70
Árboles dispersos	2.50
Urbanismo	1.00

Fuente: Autor

En la Figura 109 se muestra cartografiada la susceptibilidad por este componente.

**6.1.5. Unidades geológicas para Ingeniería UGI** Para el cálculo de la susceptibilidad por este componente, se consideraron varios factores distintos descritos a continuación:

a) Granulometría

Conforme al tamaño de grano se define este factor ponderador para cuantificar el aporte a la susceptibilidad. El valor se asignó en base a la siguiente calificación heurística:

Tabla 10.

*Factores multiplicadores para ponderación del factor contribuyente granulometría en el cálculo de la susceptibilidad por el componente de UGI*

<b>FM GRANULOMETRÍA</b>	
<b>Gravas</b>	3.1 a 5.0
<b>Arenas</b>	1.1 a 3.0
<b>Finos</b>	0.0 a 1.0

Fuente: Autor

b) Selección

El factor ponderador para cuantificar el aporte a la susceptibilidad de la selección de cada una de las unidades se asignó en base a la siguiente calificación heurística:

Tabla 11.

*Factores multiplicadores para ponderación del factor contribuyente selección en el*

<b>FM SELECCIÓN</b>	
<b>Mal seleccionado</b>	3.75 a 5.00
<b>Moderadamente seleccionado</b>	2.50 a 3.75
<b>Bien seleccionado</b>	1.25 a 2.50
<b>Muy bien seleccionado</b>	0.00 a 1.25

Fuente: Autor

c) Consistencia a dureza:

La dureza puede ser relativa (como la escala de dureza Mohs, quien la definió en 1825, para los minerales) o medida mediante el índice de dureza, también llamado Índice de Resistencia, ID o IR, está definido por la relación entre IP y el índice de flujo. Este

índice representa la rapidez con que el suelo pasa del estado semisólido al estado líquido según la magnitud del rango de plasticidad, es decir, a menor valor del índice de flujo, el índice de dureza tendrá un mayor valor, o sea, la susceptibilidad a originar un estado líquido (flujo de lodos), será menor: a menor valor del índice de flujo, el suelo será más susceptible a pasar rápidamente a un estado líquido (Osorio, 2010).

Tabla 12.

*Factores multiplicadores para ponderación del factor contribuyente consistencia-dureza en el cálculo de la susceptibilidad por el componente de UGI*

<b>FM CONSISTENCIA - DUREZA (ROCA)</b>	
<b>Blanda</b>	3.75 a 5.00
<b>Moderadamente dura</b>	2.50 a 3.75
<b>Dura</b>	1.25 a 2.50
<b>Muy dura</b>	0.00 a 1.25

Fuente: Autor

El factor ponderador para cuantificar el aporte a la susceptibilidad de la consistencia de cada una de las unidades se asignó en base a la anterior calificación heurística.

d) Densidad relativa

La densidad relativa es una manera de indicar el grado de compactación de un suelo, sean granulares naturales o para rellenos compactados. El factor ponderador para cuantificar el aporte a la susceptibilidad de la densidad relativa de cada una de las unidades se asignó en base a la siguiente calificación heurística:

Tabla 13.

*Factores multiplicadores para ponderación del factor contribuyente densidad relativa en el cálculo de la susceptibilidad por el componente de UGI*

<b>FM DENSIDAD RELATIVA (SUELO)</b>	
<b>Suelto</b>	3.41 a 5.00
<b>Denso</b>	1.71 a 3.40
<b>Muy denso</b>	0.00 a 1.70

Fuente: Autor

e) Fracturación

Hoek (1994) y Hoek et al. (1995; en González et al., 2002) propusieron un índice geológico de resistencia, GSI (geological strength index), que evalúa la calidad del macizo en función del grado y las características de la fracturación, estructura geológica, tamaño de los bloques y alteración de las discontinuidades.

Posteriormente, Hoek y Brown (1997; en González et al., 2002) efectuaron la caracterización de macizos rocosos, en base a su grado de fracturación y el estado de las juntas, y teniendo en cuenta el estado y dimensión del frente de excavación: esta define cuatro rangos de resistencia, variando de Bloques Regulares (BR, macizo rocoso sin alterar) hasta la Fracturación Intensa (FI, macizo rocoso muy fracturado). El factor ponderador para cuantificar el aporte a la susceptibilidad de la fracturación de cada una de las unidades litológicas se asignó en base a la siguiente calificación heurística:

Tabla 14.

*Factores multiplicadores para ponderación del factor contribuyente fracturación en el*

<b>FM FRACTURACIÓN</b>	
Desintegrado	4.1 a 5.0
Fragmentos en bloque desajustados	3.1 a 4.0
Muy fragmentado en bloque	2.1 a 3.0
Fragmentado en bloque	1.1 a 2.0
Masivo	0.0 a 1.0

Fuente: Autor

f) Meteorización

El factor se ponderó con los mismos factores descritos en el componente 5.1.1 *Geología*.

A continuación, se presenta el consolidado con los factores de ponderación y el resultado de la calificación de susceptibilidad heurística para el componente de susceptibilidad por UGI: Tabla 15.

*Ponderación definitiva de la susceptibilidad por el factor de UGI*

<b>Nomenclatura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Comportamiento General</b>
Shaur	Suelo de hábitats urbanos	Suelo
Strcs	Suelo traslocado subreciente	Suelo
Srext	Suelo y roca excavados	Suelo
Strca	Suelo traslocado antiguo	Suelo
Strcc	Suelo traslocado con sedimentos	Suelo
Rsalc	Roca sedimentaria areno lodosa consolidada	Roca
Rstef	Roca sedimentaria terrígena expuesta en terrazas	Roca
Rstet	Roca sedimentaria terrígena expuesta en taludes de vías	Roca

<b>Nomenclatura</b>	<b>Granulometría - Selección</b>	<b>FM GS</b>	<b>Consistencia o dureza</b>	<b>FM C</b>
Shaur	Finos - Mal a moderadamente seleccionado	2.50	NE	0.00
Strcs	Finos - Mal seleccionado	2.75	NE	0.00
Srext	Finos y gravas - Mal seleccionado	3.13	NE	0.00
Strca	Finos y gravas - Moderadamente seleccionado	2.00	NE	0.00
Strcc	Finos - Moderadamente seleccionado	1.85	NE	0.00
Rsalc	Finos y arenas - Moderadamente seleccionada	2.25	Moderadamente dura a blanda	3.75
Rstef	Arenas - Bien seleccionada	2.00	Dura a Blanda	3.10
Rstet	Arenas - Muy bien seleccionada	0.65	Muy dura	0.50

<b>Nomenclatura</b>	<b>Densidad relativa</b>	<b>FM DR</b>	<b>Fracturación</b>	<b>FM FR</b>	<b>Susceptibilidad Factor Geológico</b>
Shaur	Suelta	4.50	NE	0.00	3.50
Strcs	Densa	3.30	NE	0.00	3.03
Srext	Densa	2.40	Muy fragmentado en bloque	2.50	2.68
Strca	Densa	2.20	NE	0.00	2.10
Strcc	Densa	1.80	NE	0.00	1.83
Rsalc	NE	0.00	Masiva	0.40	2.13
Rstef	NE	0.00	Masiva estratiforme	1.00	2.03
Rstet	NE	0.00	Fragmentado en bloque	1.50	0.88

Fuente: Autor

En la Figura 110 se muestra cartografiada la susceptibilidad por este componente.

### 6.1.6. Hidrología

Para esta variable se consideraron los siguientes tres aspectos:

a) Longitud

Aquí se asigna un factor multiplicador conforme a la longitud del drenaje superficial (entiéndase la longitud de recorrido del agua de forma continua). El factor ponderador para cuantificar el aporte a la susceptibilidad de la longitud se asignó en base a la siguiente calificación heurística:

Tabla 16.

*Factores multiplicadores para ponderación del factor contribuyente fracturación en el cálculo de la susceptibilidad por el componente de UGI*

<b>FM LONGITUD</b>	
<b>Muy corta</b>	1.0
<b>Corta</b>	2.0
<b>Media</b>	3.0
<b>Larga</b>	4.0
<b>Muy larga</b>	5.0

Fuente: Autor

b) Temporalidad

El factor ponderador para cuantificar el aporte a la susceptibilidad de la temporalidad del drenaje se asignó en base a la siguiente calificación heurística:

Tabla 17.

*Factores multiplicadores para ponderación del factor contribuyente fracturación en el cálculo de la susceptibilidad por el componente de UGI*

<b>FM TEMPORALIDAD</b>	
<b>Efímera</b>	1.0
<b>Estacional</b>	2.0
<b>Intermitente</b>	3.0
<b>Peremne</b>	4.0
<b>Antrópica - permanente</b>	5.0

Fuente: Autor

## c) Área de incidencia

El factor ponderador para cuantificar el aporte a la susceptibilidad del área de incidencia de los drenajes superficiales cartografiados se asignó en base a la siguiente calificación heurística:

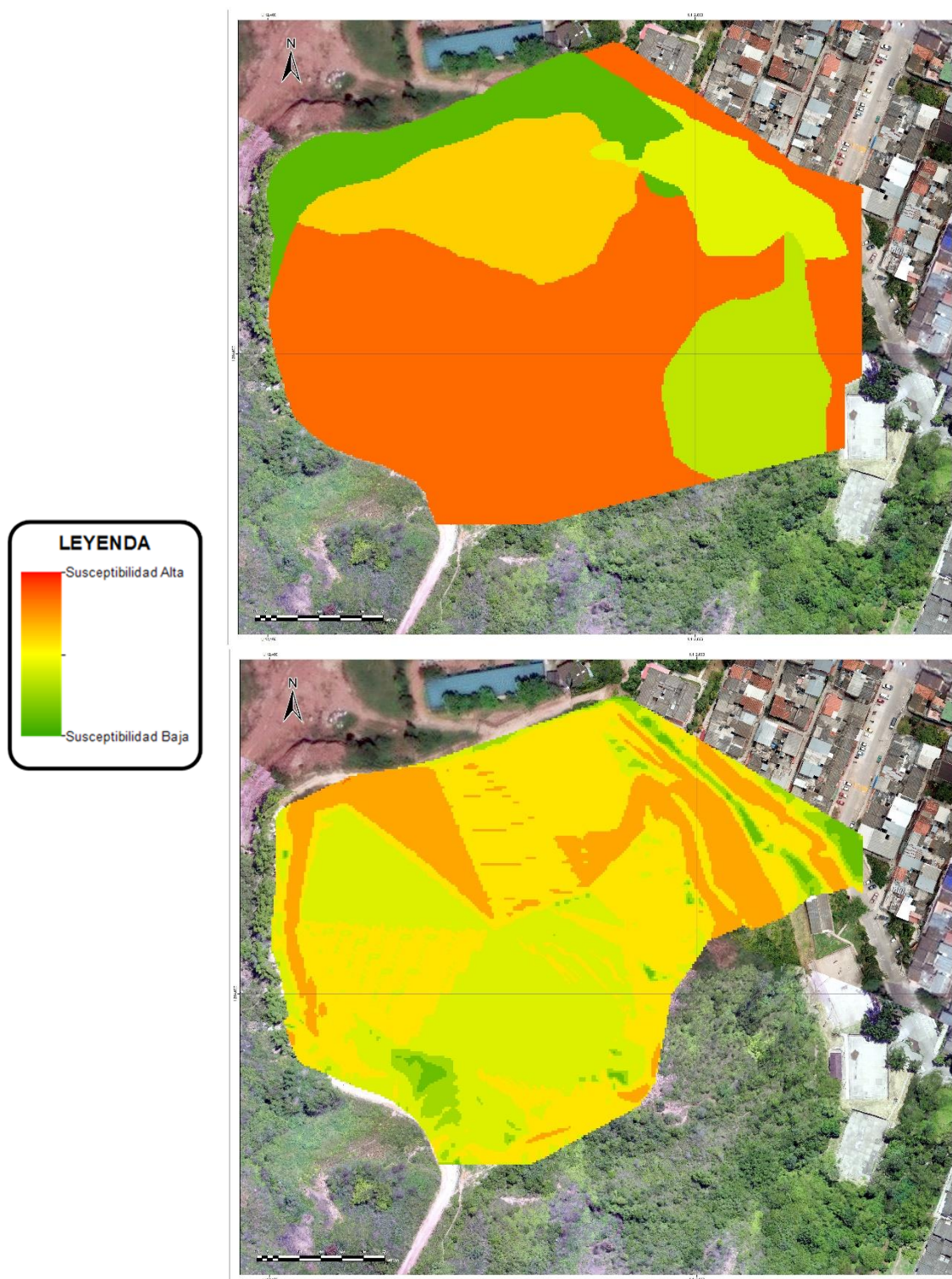
Tabla 18. *Factores multiplicadores para ponderación del factor contribuyente fracturación en el cálculo de la susceptibilidad por el componente de UGI*

<b>FM ÁREA DE INCIDENCIA</b>	
<b>Lejana</b>	3.75 a 5.00
<b>Periférica</b>	2.50 a 3.75
<b>Cercana</b>	1.25 a 2.50
<b>Interna</b>	0.00 a 1.25

Fuente: Autor

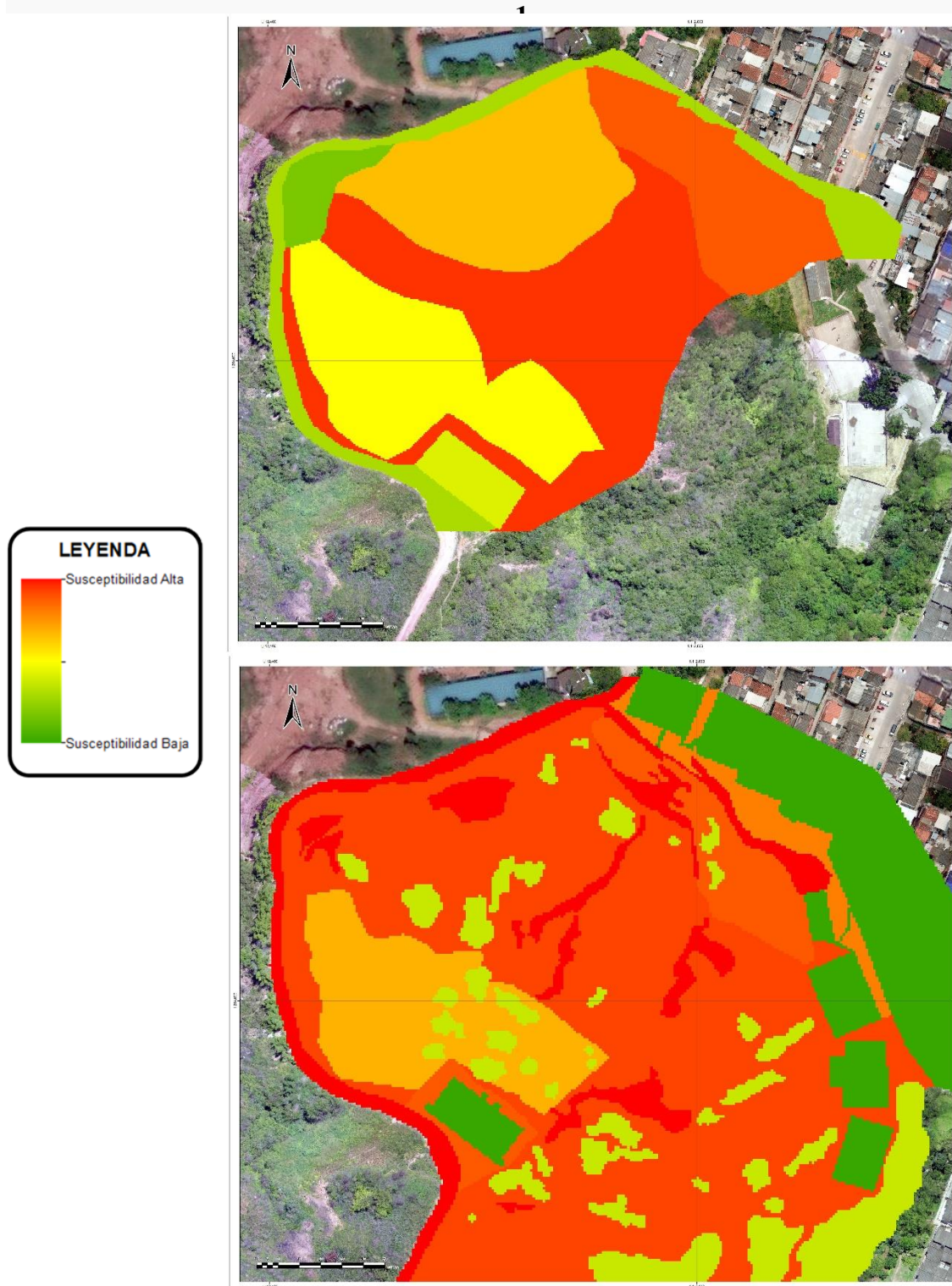
En la Figura 111 se muestra cartografiada la susceptibilidad por este componente.

Figura 106 y 107. Modelo de susceptibilidad acorde a la ponderación de los respectivos factores contribuyentes para los componentes geológico (arriba) y de pendientes (abajo).



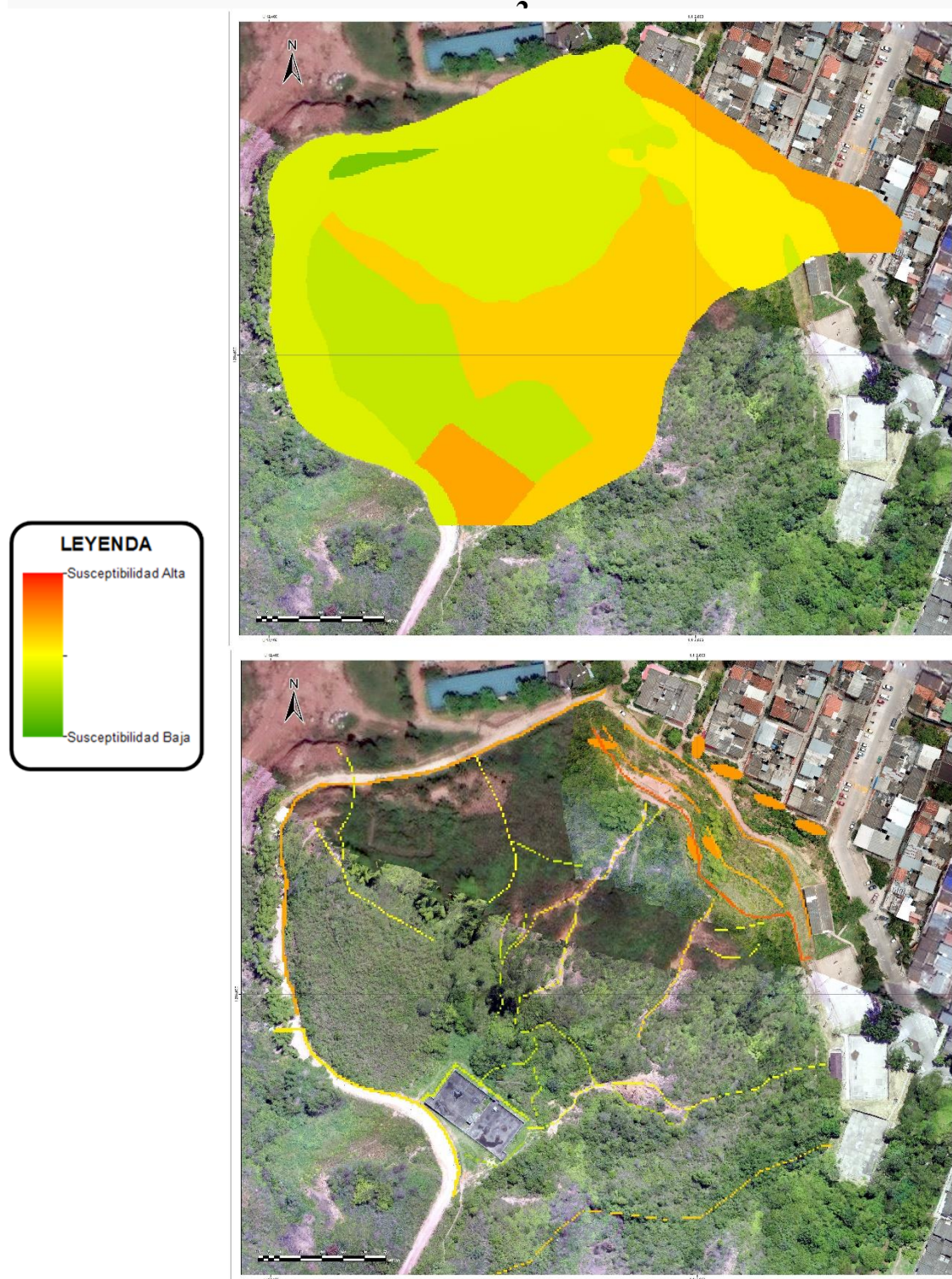
Fuente: Autor

Figura 108 y 109. Modelo de susceptibilidad acorde a la ponderación de los respectivos factores contribuyentes para los componentes geomorfológico (arriba) y de coberturas y usos del suelo (abajo).



Fuente: Autor

Figura 110 y 111. Modelo de susceptibilidad acorde a la ponderación de los respectivos factores contribuyentes para los componentes de unidades geológicas para ingeniería UGI (arriba) e hidráulico (abajo).



Fuente: Autor

## 6.2. Modelo de susceptibilidad a movimientos en masa tipo deslizamientos

En el trabajo de Jaimes (2016) se zonificó la susceptibilidad ponderando tres criterios: a) Geología; b) Geomorfología; c) Usos del suelo. Es discutida acá la precisión de tales resultados, teniendo en cuenta el mapa de inventario de movimientos en masa y la cantidad de variables parametrizadas. En la Tabla 19 se muestra el esquema de los criterios y ponderaciones del modelo de susceptibilidad y Figura 171 se aprecia el producto cartográfico. La escala con la que se realizó el trazado de las unidades, la realización del ortofotomosaico, la exploración geofísica, y el trabajo con la comunidad afectada enriquecen el modelo de susceptibilidad planteado en la presente tesis en comparación al modelo de Jaimes (2016) y busca contribuir al conocimiento del riesgo para este sector.

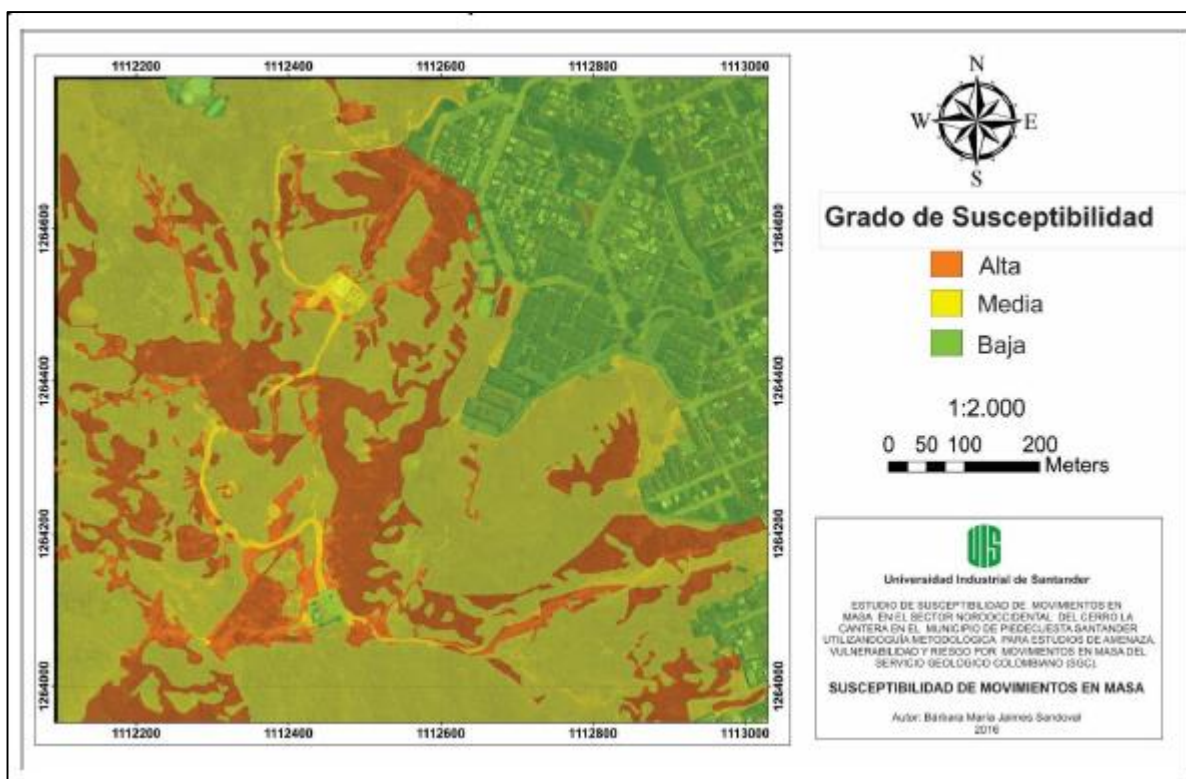
Tabla 19. *Parámetros modelo de susceptibilidad multicriterio de movimientos en masa*

MODELO MULTICRITERIO SUSCEPTIBILIDAD DE MOVIENTOS EN MASA	
INSUMOS	1. Mapa de Unidades Geológicas para la Ingeniería UGI. 2. Mapa de Elementos Geomorfológicos. 3. Mapa de Usos del Suelo
PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS	Valores para asignar las ponderaciones: Mayor Importancia (1). Menor Importancia (3).
FUJO DE PROCESOS DE DATOS	
PONDERACIÓN	Geología 35% Geomorfología 35% Uso del Suelo 30% Total 100%

Fuente: Jaimes (2016)

En ese orden de ideas, una vez evaluada la susceptibilidad de cada uno de los componentes, se realiza el modelo de susceptibilidad final, ponderando el resultado de los seis bloques de caracterización geoambiental. También, se realizó la calibración interna de pesos intravariabes, con los factores multiplicadores definidos.

Figura 112. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa, tipo deslizamiento, del barrio Bariloche etapa II de tesis de pregrado.



Fuente: Jaimes (2016).

Estos modelos rasterizados de cada uno de los componentes se ajustan empleando herramientas SIG y mediante álgebra de mapas se consolidan en un modelo de susceptibilidad final consecuente con el peso de cada uno de los componentes mostrado en la Tabla 20.

La incidencia de cada uno de los factores, así como los ajustes y calibración del modelo de susceptibilidad final se determina de forma heurística pero concordante con el inventario de procesos morfodinámicos, la evolución histórica de los mismos, y su distribución actual. El peso de las variables se muestra en la Tabla 20 y el resultado del modelado y álgebra de mapas se muestra en el Anexo 12 (plasmado en la Figura 113).

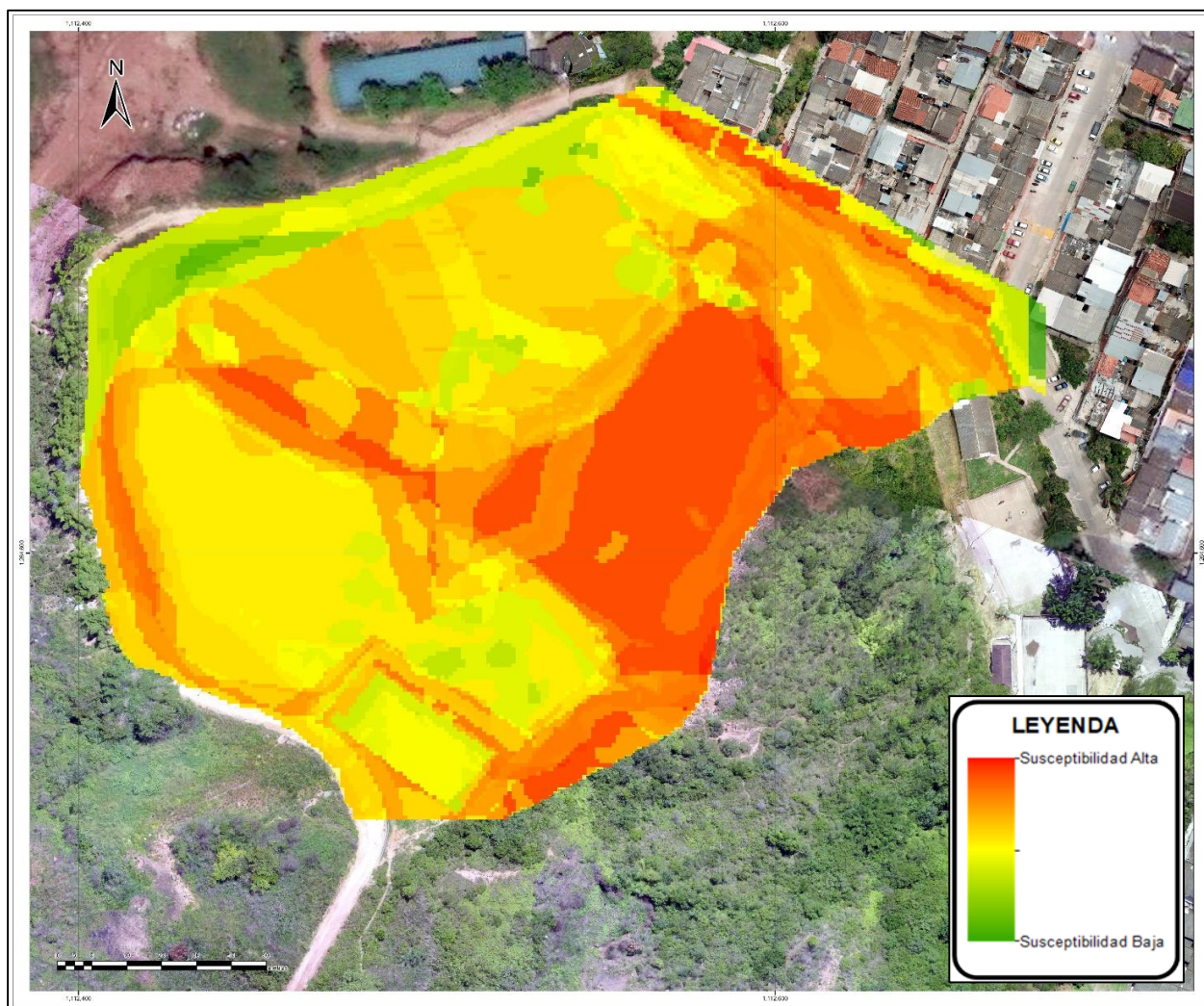
Tabla 20.

*Ponderación de los criterios de susceptibilidad a movimientos en masa tipo deslizamiento*

PONDERACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD	
<b>Geología</b>	20.0 %
<b>Pendientes</b>	8.0 %
<b>Unidades Geomorfológicas</b>	14.0 %
<b>Cobertura</b>	16.0 %
<b>UGI</b>	24.0 %
<b>Hidrología</b>	18.0 %

Fuente: Autor

*Figura 113. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa, tipo deslizamiento, del barrio Bariloche etapa II.*



Fuente: Autor.

## 7. Diagnóstico de las viviendas, factor social y estimación de la vulnerabilidad semicuantitativa

### 7.1. Conceptualización y Métodos de Evaluación

En primera instancia se presenta algunas definiciones básicas sobre vulnerabilidad, cuya intervención y reducción es una herramienta efectiva para prevenir desastres y la gestión del riesgo.

La vulnerabilidad<sup>3</sup> se entiende como la condición o grado de exposición en que se encuentran las personas y los bienes ante una amenaza, los cuales tienen una determinada incapacidad o inestabilidad para afrontarla (por su nivel de información, capacitación o por su cantidad, calidad, ubicación, conformación material y disposición funcional, entre otros factores inherentes a la condición humana). En este sentido, la vulnerabilidad puede ser entendida como “incapacidad de resistencia” ó “incapacidad de recuperación”, y no depende sólo del carácter de la amenaza sino también de las condiciones del entorno (Reyes, 1998 y 2001).

La vulnerabilidad es función de la conducta humana; describe el grado en que un sistema socio-económico es susceptible al impacto de los fenómenos naturales. Incluye aspectos como el grado de conciencia y aceptabilidad de los fenómenos naturales y las amenazas, el estado de los asentamientos humanos y la infraestructura (vulnerabilidad física), las políticas y la gestión pública, y la capacidad de organización y respuesta en todas las etapas de los desastres; la gestión de riesgos (los desastres son riesgos no manejados), la gerencia de operaciones (fases de atención y respuesta) y la promoción del desarrollo (recuperación, rehabilitación, reconstrucción, etc.).

La vulnerabilidad es un fenómeno eminentemente social, relacionado con las carencias de desarrollo que presenta una sociedad (MAVDT, 2005). Por ello la diferencia en vulnerabilidad

---

<sup>3</sup> Denominada como *Vulnerability*, *vulnerabilità* y *vulnérabilité* en las escuelas de investigación de lengua anglosajona, italiana y francesa.

determina el carácter selectivo de la severidad del mismo sobre los primeros: Entre más vulnerable sea una población mayor será el riesgo de que un fenómeno natural se convierta en desastre.

Reducir la vulnerabilidad es una estrategia para la prevención de desastres, ya que algunas de las amenazas naturales tienen diversos grados de complejidad y no pueden ser intervenidas, controlarlas o reducirlas al máximo. De todas formas, no existe la vulnerabilidad cero.

En el presente estudio se aplicó el análisis vulnerabilidad a la dimensión físico-estructural y de la población que ocupa algunas de las viviendas con mayor exposición a la amenaza por remoción en masa del barrio Bariloche II y/o que fueron las más impactadas por el evento del año 2013. Exclusivamente son treinta y dos (32) familias que integran la Junta de Acción Comunal del barrio Casa Loma. El mapa de vulnerabilidad física de viviendas está en el listado de Anexos con el No. 10.

Dicha evaluación se efectuó por métodos observacionales directos, analíticos multivariable, y aplicando un algoritmo que considera los principales factores y de mayor jerarquía para dimensionar y obtener una vulnerabilidad semicuantitativa mediante la generación de rangos y fórmulas que permiten su semicuantificación aplicando algoritmos heurísticos mediante factores multiplicadores, siendo una nueva propuesta que es aplicada exclusivamente para el barrio Bariloche II etapa por medio de la consideración y combinación de las variables determinadas a partir del levantamiento topográfico-priorización, censos familiares, la inspección ocular, la medición directa predio a predio y el diligenciamiento del Diagnóstico del Estado de las Viviendas (DEV), bajo seis (6) aspectos básicos: Datos generales; características constructivas; obras de contención; patología preliminar de las estructuras, que permite cuantificar y ubicar los daños; análisis de vulnerabilidad (grado de daños y vulnerabilidad encontrado); y recomendaciones de mitigación estructural. En la actual propuesta se pondera con los siguientes porcentajes las



## **7.2. Vulnerabilidad físico-social de las viviendas del barrio Bariloche II etapa.**

Mediante el diligenciamiento del formato de Diagnóstico del Estado de las Viviendas fue identificada la dimensión poblacional que corresponde a la presencia del número de familias por cada casa y a su vez es posible la obtención de información a más detalle con respecto al número total de residentes determinando la presencia de adultos mayores, adultos y niños en las casas evaluadas estratégicamente, debido a que es una variable muy importante a considerar.

Es identificado que la mayor parte de las casas evaluadas (8) poseen dos pisos y las demás viviendas (7) presentan tres pisos como se observa en las Figuras 115 y 116. Todas las viviendas (14) poseen cimentaciones superficiales al igual que estructuralmente tienen vigas y columnas (cabe resaltar que en algunas viviendas no fue posible constatar), exceptuando una sola casa a esta última característica mencionada, en general poseen buenos materiales de construcción donde la mayoría evidencia estar construida en mampostería de arcilla confinada con elementos estructuras, así como acabados y pintura en buen estado, dominando los pisos en baldosa y en menor cantidad en cemento en lo posiblemente observado.

Las construcciones que presentan cubiertas tienen una armazón metálica con tejas de zinc o Eternit como se observa en las Figuras 118 y 119, en general las viviendas presentan manejo de aguas lluvia por medio de canales y bajantes de aguas lluvias principalmente en PVC.

Las patologías constructivas son principalmente fisuramientos que se reflejan en paredes (3 casas), pisos (2 casas) y vigas (2 casas), conforme las Figuras 119 y 120, y a su vez existen humedades en dos casas como se observa en la Figura 121, la cuales se ubican en la parte inferior de paredes o zócalo siendo encontradas con baja densidad respecto a presencia e intensidad.

*Figura 115 y 116. Vivienda con tres pisos y dos ubicadas en la zona de estudio*



Fuente: Autor

*Figura 117 y 118. Casas con cubierta metálica y tejas de zinc*



Fuente: Autor

*Figura 119 y 120. Fisuras presentes en pisos y vigas.*



Fuente: Autor.

*Figura 121. Humedades en fachadas y muros de las viviendas examinadas*



Fuente: Autor.

### 7.3. Análisis de Resultados y la Zonificación de la Vulnerabilidad Físico-Social.

A partir de las características identificadas mediante el formato DEV es posible la realización de la zonificación de la vulnerabilidad físico-social, la cual en resumen se encontró que, para las construcciones habitacionales evaluadas en el área urbana de Piedecuesta, plasmadas en el Mapa 10 de Vulnerabilidad Física de las Construcciones a escala 1:250, se presentan:

Vulnerabilidad baja (Vb): 3 viviendas.

Vulnerabilidad media (Vm): 8 viviendas.

Vulnerabilidad alta o muy alta (Va): 3 viviendas.

En el Anexo 13 se presentan los listados con los resultados del análisis de vulnerabilidad física aplicado a 14 predios, ubicados en el borde del talud del Cerro la Cantera, afectados por el evento de 2013.

En general, los resultados del análisis de vulnerabilidad muestran que las edificaciones evaluadas en el barrio Bariloche II etapa son aceptables, para uso hasta de dos pisos: cerca del 21% están definidas con vulnerabilidad alta (Va), el 57% con vulnerabilidad media (Vm) y 22% tienen una vulnerabilidad baja (Vb).

La asignación semicuantitativa otorgada según la metodología es incorporada en una Geodatabase como una featureclass en ArcMap para cada una de las casas inspeccionadas por medio de los formatos DEV utilizados con lo cual es posible su zonificación.

La vulnerabilidad física se presenta especialmente en las viviendas de hasta tres pisos y sin columnas y vigas, así como en las casas con dos pisos, pero sin área construida que presentan un sistema deficiente de manejo de aguas lluvia, según tipologías de cubiertas observadas (necesidad de canales y bajantes, vigas-canales).

## 8. Exploración geotécnica y modelo geológico - geotécnico

Son realizados por el autor estudios geofísicos en la zona de investigación por medio de ensayos de refracción sísmica y de ondas superficiales (MASW), que extrae del análisis espectral de las ondas sísmicas de superficie una estimación de la variación de la velocidad de propagación de las ondas S,  $V_s$ , con la profundidad, en una campaña en julio de 2019 con el fin de obtener un modelo geológico en profundidad que sea lo más acertado posible a la realidad. Además, en el área de estudio fue llevado a cabo una campaña geofísica por el Area Metropolitana de Bucaramanga y Consorcio Geoingeniería (2016).

*Figura 122.* Localización de estudios geofísicos y geotécnicos realizados en el talud aledaño al barrio Bariloche II etapa.



Fuente: AMB – Consorcio Geoingeniería (2016).

AMB y el Consorcio Geoingeniería (2016) realizaron estudios geotécnicos por medio de métodos de exploración con sondajes, a rotación y lavado, y varios apiques en algunos sectores, siendo llevado a cabo dos sondeos por rotoperCUSión en suelo, roca o conglomerado con diámetro HQ con revestimiento e incluyendo SPT; allí y a la misma altura, a su vez fueron realizados dos apiques con dimensiones de 1x1x2 metros para la obtención de muestras alteradas.

*Figura 123.* Ubicación de la línea de refracción sísmica LS1 realizada por el autor en talud ubicado en el Barrio Bariloche II del municipio de Piedecuesta, departamento de Santander.



Fuente: Autor

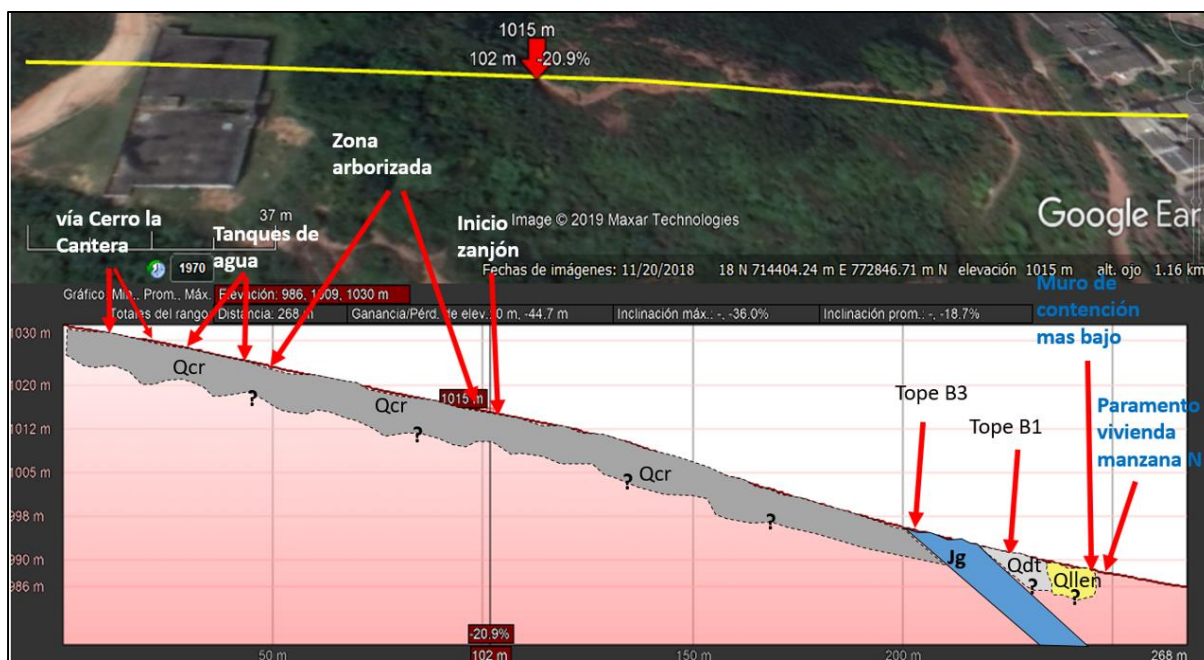
En el **Apéndice 2: “Exploración Geotécnica”** se abarca con detalle la exploración realizada, mediante la cual se establece a continuación un perfil geológico-geotécnico típico para su uso en modelos deterministas.

### **8.1. Esquemas y perfil Geológico Indicativo y Geológico-Geofísico Local.**

A continuación, el autor propone un perfil en profundidad, representativo para la compleja zona evaluada en la tesis, cotejando la geología superficial, los sondajes geotécnicos y data geofísica.

En la Figura 124, se muestra el perfil elaborado por la tesis de Jaimes (2016) como punto de partida para consolidar el perfil geológico y geofísico indicativo local.

Figura 124. Corte geológico previo, elaborado en una tesis de pregrado en geología de la UIS.

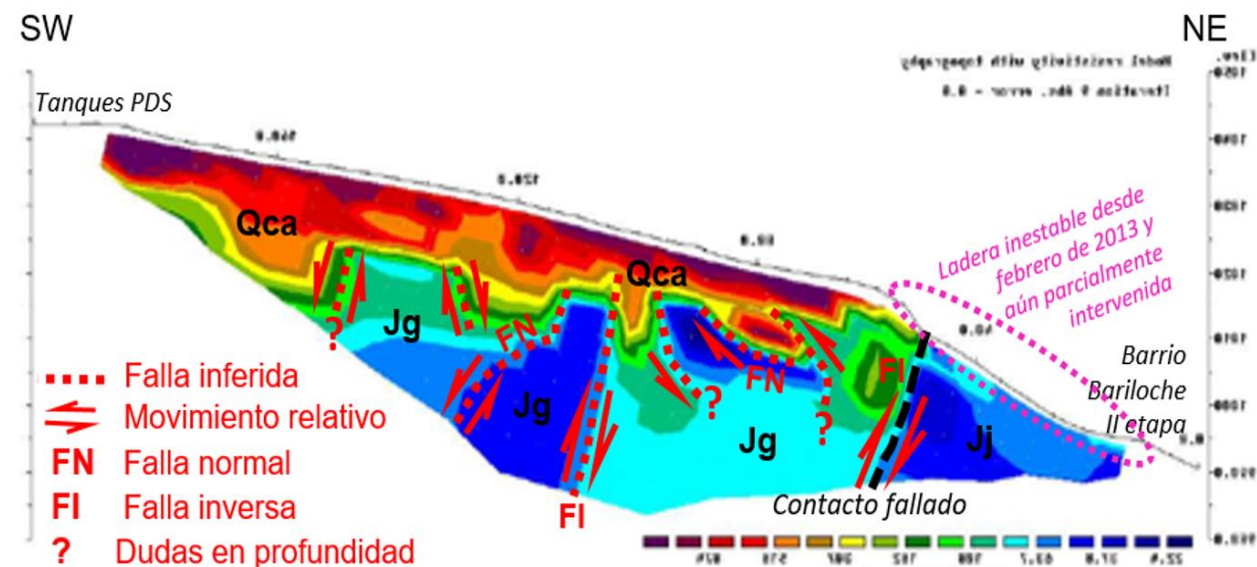


Fuente: Jaimes (2016)

La presente tesis de maestría integró la información anterior y determinó la presencia de tres tipos de materiales con interés geotécnico: a) Las unidades de rocas propiamente dichas (representadas por la Formación Jordán y el segmento inferior del Grupo Girón); b) depósitos traslocados (coluviales de subrecientes hasta antiguos, principalmente en tres categorías según su granulometría, composición y actividad); y c) depósitos de remociones en masa y también con llenos de origen antrópico, puntualmente ubicados sobre la base oriental de la ladera. Esto conformaría el soporte del modelo geológico, concordante con el mapa de UGI y los sondeos geotécnicos.

Así, la Figura 125, que fue reinterpretada de la imagen de tomografía EM 2D, se observan claramente las unidades geológico-geofísicas, con zonas de alta y baja resistividades.

Figura 125. Modelo Geológico-Geofísico (sobre imagen tomográfica EM), propuesto en la ladera occidental del barrio Bariloche II etapa. Nótese la disposición de la Formación Jordán (Jj), el Grupo Girón (Jg) y el coluvión antiguo (Qca) dentro de un importante sistema de fallas inverso, con fallamiento normal relacionado.



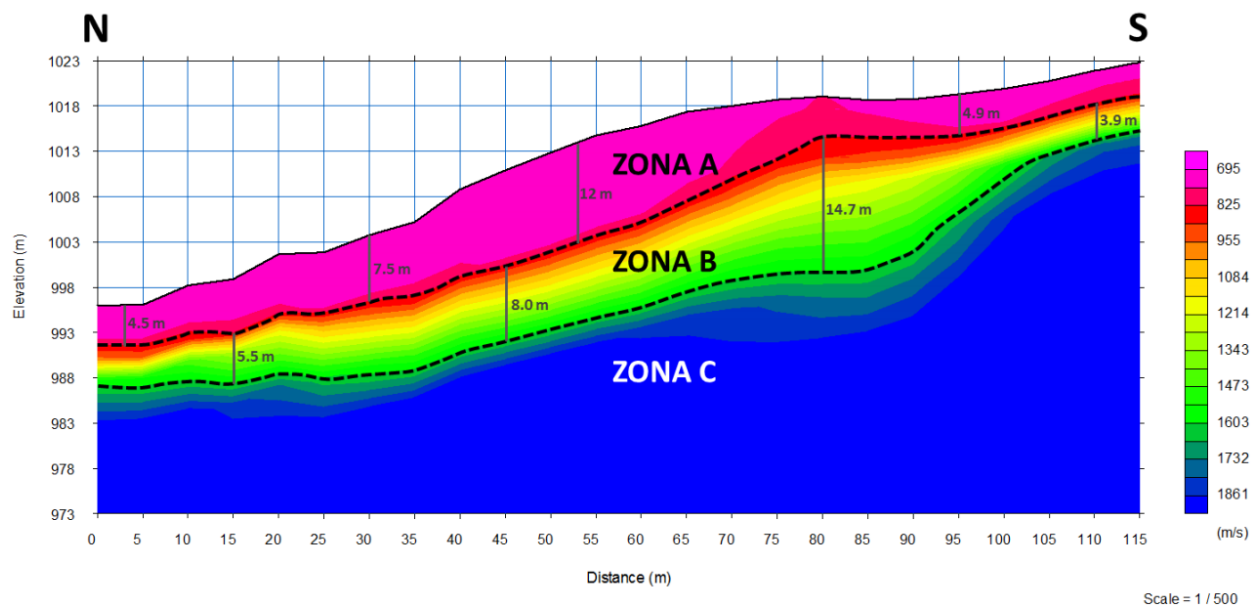
Fuente: Autor

Como se nota, el aporte de los rasgos geoestructurales locales (esto es, la estratificación, las orientaciones marcadas de diaclasamientos y el sistema de fallamiento de tipo inverso, con sistemas secundarios normales, conjugados y de geometría ortogonal) son fuertes condicionantes en la tipología de las rupturas: esto significa que tales atributos endógenos definen las remociones en masa o movimientos de las laderas en consideración, antes detalladas.

Este modelo en profundidad guarda mucha similitud con el perfil de refracción sísmica adquirido en campo a mediados del 2019, con orientación aproximada S-N, que fue procesado e interpretado para reconocer en general a dos capas principales: la primera con velocidad de onda compresional ( $V_p$ ) de 695 m/s que corresponde al citado depósito coluvial, y la segunda capa con velocidad de onda  $V_p$  de 1862 m/s, correlacionables con la Formación Jordán y/o el Grupo Girón. Por otra parte a los datos de la tomografía de la imagen anterior se le efectuó un nuevo procesamiento mediante inversión sísmica: en tal línea de resistividad invertida se estimó que superficialmente hay también un depósito coluvial seco (con altas resistividades, desde 890 y hasta

por encima de 9100 Ohm-m), definiendo espesores aproximados entre los 4.5 y 12.0 metros, y una zona subyacente, con bajas resistividades (de 148 a 7 Ohm-m) típicas de rocas de basamento jurásico, duras pero fracturadas y meteorizadas, con espesor variable desde 3.9 a 20.0 metros.

*Figura 126.* Resultado del ensayo de refracción sísmica, para el modelo de la tomografía 2D: son definidas tres zonas, explícitas dentro de los párrafos respectivos.

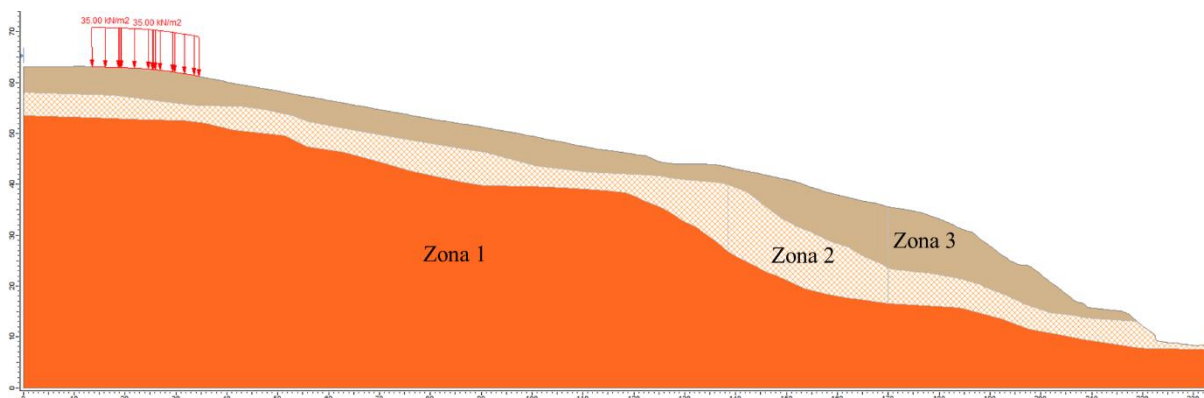


Fuente: Autor

El perfil geológico – geotécnico estará entonces conformado por 3 capas o zonas homogéneas conforme a lo mostrado en la Figura 127. La zona 3 corresponde al material caracterizado como depósitos coluviales recientes, llenos antrópicos, material traslocado de excavaciones, y depósitos de los procesos morfodinámicos. Este material también aparece en la exploración geotécnica con espesores variables entre los 3 y los 5 metros, donde se pudo llevar a cabo la exploración a percusión y aparece registro de ensayo de penetración estándar, y las muestras se clasifican en su mayoría como arenas arcillosas. La zona 2 es un material poco traslocado, depósitos coluviales antiguos, suelo consolidado producto de la meteorización de las rocas subyacentes, donde los sondeos a rotación muestran núcleos de material arcillolimoso consolidado. La zona 1 corresponde

a las unidades de roca propiamente dichas de la Formación Jordán y el segmento inferior del Grupo Girón.

*Figura 127.* Resultado del ensayo de refracción sísmica, para el modelo de la tomografía 2D: son definidas tres zonas, explícitas dentro de los párrafos respectivos.



Fuente: Autor

En el **Apéndice 3: “Comparativo entre el análisis de estabilidad realizado por AMB (2016), Jaimes (2016), y un análisis utilizando el perfil geológico – geotécnico propuesto en la presente tesis”** se realiza un análisis de estabilidad general para este perfil y se comparan los resultados con los obtenidos por la consultoría realizada por el AMB (2016).

## 9. Conclusiones

Las unidades geológicas identificadas por medio del reconocimiento en campo corresponden principalmente a depósitos que cubren la mayor parte de la zona de estudio, siendo clasificados en Depósitos Coluviales Antiguos, Recientes, de Llenos de Origen Antrópico y de Taludes y bermas. En menor porcentaje de área se encuentra la Formación Jordán y con mayor patrón de afloramiento el Grupo Girón.

Son identificadas estructuras primarias (estratificación) y secundarias (diaclasas y fallas geológicas) que afectan de manera directa a la unidad geológica Formación Girón por medio de un sistema de diaclasas ortogonal en mayor medida y en menor un sistema irregular, siendo una característica controlada tectónicamente por estructuras regionales en las cercanías de la zona de estudio y que corresponde a un factor importante que involucra de manera directa la estabilidad de los materiales.

Son clasificadas ocho unidades geológicas para ingeniería (UGI) teniendo en cuenta la textura, estructura y génesis involucrada en la formación de estos, siendo un insumo importante para el análisis y zonificación del presente estudio por su aporte al conocimiento de los procesos geológicos involucrados allí.

La cartografía geomorfológica y su análisis permiten identificar como los procesos morfodinámicos son un factor importante en la susceptibilidad por movimientos en masa con procesos erosivos de diferente intensidad entre los que prima la erosión hídrica que en algunos sectores tiende a ser avanzada, esto evidenciado en geoformas de hondonadas. A su vez, son evidenciados fenómenos geomorfológicos actualmente activos por los procesos de la geodinámica externa.

El área de investigación se encuentra, hablando morfológicamente y jerárquicamente desde las escalas macro a micro, en la Geomorfoestructura Andes Colombianos, provincia Cordillera Oriental, región de Mesas y Valles, unidad Cerro de la Cantera, subunidad Vertiente Nororiental y en la componente laderas disectadas y terrazadas.

La zona de estudio se encuentra ubicada dentro de un ambiente morfogenético local morfoestructural a denudacional con modelado pluvial-hídrico en el que ocurren escorrentías fluviales o drenajes juveniles modificados por la hidrología urbana.

La geometría general de los terrenos evaluados es ondulosa convexa, esquina nororiental exhumada del Cerro de la Cantera, puntualmente con laderas más cóncavas que semi-convexas que reflejan la interacción de los procesos endógenos, los agentes morfológicos, climatológicos, hidrológicos, bióticos y junto actividad humana operada desde el Antropoceno, que conducen a su meteorización, erosión y movimientos en masa.

La utilización de sensores remotos fue una gran herramienta para la identificación temporal de la evolución en el tiempo de los procesos morfodinámicos, el desfavorable uso del suelo y la modificación en varias ocasiones de la vía que conduce al Cerro de la Cantera, notándose más a lo largo del rango de tiempo analizado como estas características sumaron y suman a la inestabilidad de la zona.

Son identificadas siete unidades geomorfológicas agrupadas en tres categorías con respecto a su origen: morfoestructural (afloramientos rocosos tectonizados), denudacional (laderas cóncavas, laderas onduladas y erodadas, laderas peneplanizadas) y terrenos de hábitats urbanos (laderas peneplanizadas, taludes y bermas, tanques, terrenos urbanizados).

Otros factores contribuyentes que promueven a la susceptibilidad geomorfológica degradacional son identificados en el actual trabajo agrupados bajo el uso del suelo y corresponden

a: cultivos limpios poco favorables, coberturas secundarias desprotegidas, continuas talas, quemas locales e incendios forestales importantes que se han presentado, la desfavorable construcción de dos tanques de acueducto y ejecución de taludes de corte en la base de vertientes o laderas

Son identificadas manifestaciones de agua superficial y subsuperficial por medio de trabajos de campo y con apoyo de sensores remotos, sin realizar una evaluación hidrológica e hidráulica detallada puesto que no es el objetivo del presente trabajo, identificando una incidencia e importante aporte a la modificación del estado tenso-deformativo de los materiales geológicos, siendo un factor contribuyente exógeno para la susceptibilidad a movimientos en masa.

Son identificados por medio de trabajo de campo y cartografía las siguientes categorías para el mapa de hidrología local: drenajes naturales, cunetas y zanjas de bermas, drenajes de vías, zonas húmedas y goteos a flujos discontinuos.

El clima, la hidrología, la geología y las geoformas, junto al uso desfavorable del suelo y las coberturas vegetales, el fuerte y dinámico contexto urbano-metropolitano que presiona con vías y su posterior modificación, viviendas, líneas vitales y otros equipamientos, han sido los factores predominantes para conducir a la susceptibilidad de estos terrenos ante los procesos de la geodinámica exógena o externa.

La susceptibilidad por movimientos en masa en la presente zona de estudio es influenciada no solo por factores endógenos, sino también exógenos que involucran a su vez el factor antrópico como posibles acelerantes a deslizamientos como el ya ocurrido en el 2013. Es claro entonces que este proceso es el resultado de una sumatoria de variables que son tenidas en cuenta al momento de su zonificación con la asignación de porcentajes de peso a partir de su importancia.

La presente metodología utilizada para la zonificación por susceptibilidad a movimientos en masa corresponde a una nueva propuesta heurística que involucra además el componente físico-

social en su diligenciamiento, denotando la importancia del trabajo con las comunidades afectadas, la memoria histórica de los eventos desastrosos, y la identificación de los factores contribuyentes a escala detallada.

Se ponderó la susceptibilidad de 1 (muy baja) a 5 (muy alta) para diversos factores contribuyentes (endógenos o exógenos) de 6 componentes; geología con un porcentaje de incidencia del 20.0%, pendientes con el 8.0%, unidades geomorfológicas con el 14.0%, cobertura del suelo con el 16.0%, unidades geológicas para ingeniería con el 24.0%, e hidrología con el 18.0%. El resultado de la ponderación de los 6 componentes es el modelo de susceptibilidad mostrado en el Anexo 12 (Figura 170) que constituye una herramienta de predictibilidad espacial para indicar un potencial de ocurrencia de eventos de remoción en masa tipo deslizamiento.

La vulnerabilidad físico-social de las viviendas se estimó de forma semicuantitativa ponderando una serie de factores agrupados en un formato DEV diligenciado para cada vivienda después de realizar una inspección visual. De las construcciones evaluadas se clasificaron 3 viviendas en vulnerabilidad baja, 8 viviendas en vulnerabilidad media, y 3 viviendas en vulnerabilidad alta.

## Referencias Bibliográficas

- Aleman, A., y Ramos, V. A. (2000). The Northern Andes. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho A., Campos, D.A. (Eds), Tectonic Evolution of South America. Spec. Publ., Rio de Janeiro, Brazil, 2000, 453-480.
- AMB - Area Metropolitana de Bucaramanga y Consorcio Geoingeniería (2016). Consultoría para realizar investigaciones geotécnicas, levantamientos topográficos, geológicos y geomorfológicos en el área metropolitana de Bucaramanga, de acuerdo a los puntos designados por la entidad, informe de investigación geotécnica barrio Bariloche II etapa, Piedecuesta, Santander. Bogotá, D. C., febrero de 2016, 106p.
- AMB - Area Metropolitana de Bucaramanga y Consorcio GEOJAM-2016 (2017). Consultoría para realizar el diseño de alternativas de mitigación para la amenaza por remoción en masa, sector Bariloche II etapa, Piedecuesta, Santander. Bogotá, D. C., septiembre de 2017, 99p.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2010). Normas Colombianas de. Diseño y Construcción Sismo-Resistente, NSR-10. Bogotá, 2010.
- Aysen, A. (2002). Soil mechanics: basic concepts and engineering application. Swets & Zeitlinger B.V., Lisse, The Netherlands, 468p.
- Ayala, F. J. (1990). Análisis de los conceptos fundamentales de riesgos y aplicación a la definición de tipos de mapas de riesgos geológicos. Instituto Tecnológico GeoMinero de España. Boletín geológico y minero. Madrid, Vol. 101-3, mayo a junio de 1990, 108-119.
- Bowles (1996). Foundation Analysis and Design, 5th edition. New York. U.S.A.
- Can, T., Nefeslioglu, H.A., Gokceoglu, C., Sonmez, H., and Duman, T. Y. (2005). Susceptibility assessments of shallow earthflows triggered by heavy rainfall at Carrara, A., Cardnali, M.,

- Guzetti, F., and Reinchenbach, P. (1995). GIS technology in mapping landslide hazard. In: A. Carrara and F. Guzzetti, eds. Netherlands, pp.135–175.
- Carvajal P., J. H. (2012). Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia. Servicio Geológico Colombiano. Ministerio de Minas y Energía. Bogotá, 2012, 83p.
- CDMB - Corporación autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (2009). Normas Geotécnicas para el control y para la realización de estudios geológicos, geotécnicos e hidrológicos en el área de jurisdicción de la CDMB, Litografía Editar Impresores, Bucaramanga, 2009.
- Cediel, F. – 1968 El Grupo Girón, una molasa Mesozoica de la Cordillera Oriental. Boletín de Geología. Servicio Geológico Nacional. Vol. XVI, Nos. 1-3, Bogotá, D.E., 1968, 95p. Disponible en: <https://revistas.sgc.gov.co/index.php/boletingeo/article/view/108>
- Cediel, F., Shaw, R., and Cáceres, C. (2003). Tectonic Assembly of the Northern Andean Block. Recuperado el 2019, de [https://www.academia.edu/3598649/Tectonic\\_assembly\\_of\\_the\\_Northern\\_Andean\\_block](https://www.academia.edu/3598649/Tectonic_assembly_of_the_Northern_Andean_block)
- Consorcio Geoingeniería (2016). Informe de investigación geotécnica, levantamiento topográfico y geofísico del barrio Bariloche II etapa. Contrato amb-217-2015 del área metropolitana de Bucaramanga, celebrado con las empresas Desarrollo en Ingeniería SA & ING Ingeniería SA. Bogotá, D.C. Febrero de 2016, 106p.
- Corominas, J., Copons, R., Vilaplana, J. M., Altimir, J. and Amigó, J. (2003). Integrated landslide susceptibility analysis and hazard assessment in the Principality of Andorra. *Natural Hazards* 30, pp. 421–435.

- CRQ - Corporación Autónoma Regional del Quindío (2000). Criterios geológicos para la planificación y manejo urbano en prevención de desastres. Primera edición, FUDESCO. Armenia, septiembre de 2000, 59p.
- CDMB - Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (2009). Normas Geotécnicas CDMB, normas técnicas para el control de erosión y para la realización de estudios geológicos geotécnicos e hidrológicos.
- Das, B. M. (2014). Fundamentos de ingeniería geotécnica. Brooks/Cole Publishing Company. Sacramento, California, 2014, 594p.
- Densmore, A. L., and Hovius, N. (2000). Topographic fingerprints of bedrock landslides. *Geology*, abril 2000, v. 28, No. 4, 371-374.
- Diederix, H., Hernández Moreno, C., Torres Jaimes, E. M. & Botero Santa, P. A. (2008). Modelo de evolución morfotectónica cuaternaria basado en evidencias estructurales, neotectónicas y paleosismológicas de los principales sistemas de falla en la región de Bucaramanga. Bogotá.
- Flageollet, J. C. (1999). Landslide hazard – a conceptual approach in risk viewpoint. En cap. 1 de R. Casale y C. Magottini editores, *Floods and landslides, integrate risk assessment*. Springer–Verlag, Berlín.
- Gansser, A., (1973). Facts and theories on the Andes: Twenty-sixth William Smith Lecture. *Journal of the Geological Society*, London, v129, p:93-131.
- Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas (2017). Estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa en el municipio de Vélez. Escuela de ingeniería civil, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, noviembre de 2017, 180p.

- GEMMA - Grupo de Estándares para Movimientos en Masa (2007). Movimientos en masa en la región Andina: una guía para la evaluación de amenazas. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, preparado como una iniciativa interinstitucional, a través del Grupo de Estándares para Movimientos en Masa (GEMMA) y el Servicio Nacional de Geología y Minería (SNGM). Publicación Geológica Multinacional No. 4, disponible en PDF e impreso en Canadá. Noviembre de 2007, 404p.
- Glade, T., and Crozier, M. J. (2005). The nature of landslide and hazard impact. En Glade, T., et al. ed., *Landslide hazard and risk*, John Willey & Sons. Chichester, U. K., 2005, 43–75.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación, Madrid, 744p, p131, 134, 193-196.
- Gonzalo, E., y Escobar, C. (2002). *Geomecánica para ingenieros*. Recuperado el 2018, de <https://godues.wordpress.com/2013/01/24/geomecanica-para-ingenieros/>
- Google Earth (2018). Google My Maps (2019).
- Grupo de Consultoría del Proyecto de Asistencia Técnica 2009 (2010). *Guía municipal para la gestión del riesgo*. Ministerio del Interior y de Justicia – Dirección de Gestión del Riesgo. Bogotá, D.C., mayo de 2010, 139p.
- Grupo de Estándares para Movimientos en Masa – GEMMA (2007). *Movimientos en masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas*. Proyecto Multinacional Andino (PMA), Geociencias para las Comunidades Andinas (GCA). Publicación Geológica Multinacional, No. 4. Impreso en Canadá, noviembre de 2007, 432p.
- Guardado L., R. y Carrión M., P. (2008). *Gestión de riesgos por deslizamientos*. Jornadas Iberoamericanas sobre gestión de riesgos por deslizamientos - GEDES 2007, editores. Cartagena de Indias, Colombia, junio de 2007. Guayaquil, enero de 2008, 338p.

- Guinau, M., Pallàs, R., and Vilaplana, J. M. (2005). A feasible methodology for landslide susceptibility assessment in developing countries: A case-study of NW Nicaragua after Hurricane Mitch. *Engineering Geology* 80, 2005, 316–327.
- Gutiérrez E., M. (2008). *Geomorfología*. Editorial Pearson, Madrid, 2008, 898p.
- Hansen, M. J. (1984). Strategies for classification of landslides. En cap. 1 de D. Brunsten y D. B. Prior, editores, *Slope instability*, John Wiley & Son. Chichester, U. K., 1984.
- Hermelin A., M. (1985). Suelos, rocas y formaciones superficiales. *Revista DYNA*, No. 106, Medellín, 1985, 25-29.
- Hoek, E., and Bray, J. W. (1981). *Rock slopes engineering*. Institution of Mining and Metallurgy, 358p.
- Hutchinson, J.N., 1988, Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. En *Memorias, 5th International Conference on Landslides*. Lausanne, 3–35.
- Hunt (1984). *Geotechnical Engineering Investigation Manual*. McGraw Hill Inc, New York. U.S.A.
- INIGEMM – Instituto Nacional de investigación geológico minero metalúrgico (2013). Memoria descriptiva del mapa de zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa, zona Zaruma-Paccha, escala 1:50 000. Fase I. República del Ecuador. Junio de 2013, 25p.
- Ingeominas (1997). *Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga, Fase I*. Convenio realizado entre la Gobernación de Santander e INGEOMINAS. Bucaramanga, 1997.

- Ingeominas (2001). Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga, Fase II. Convenio realizado entre la CDMB e Ingeominas-Subdirección de Amenazas Geoambientales. Bogotá, 2001, 270 p.
- Ingeominas, (2001). Mapa Geológico. Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga. Escala 1:25000, Bogotá.
- Ingeominas (2008). Zonificación para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta. Convenio realizado entre la CDMB e Ingeominas - subdirección de amenazas geoambientales. Síntesis tomada de ponencia ing. esp. Yolanda Calderón L., efectuada del II seminario de ingeniería sísmica y geotécnica, UPTC, Tunja, octubre de 2008, 74 diapositivas.
- Instituto Colombiano de la Reforma Agraria (1995). Resolución 02965 de 1995. Por la cual se establece el procedimiento para la práctica, elaboración y rendición de los avalúos comerciales de predios. Bogotá, 16p.
- Jaimes, B., (2016). Estudio de susceptibilidad de movimientos en masa en el sector Norooccidental del Cerro La Cantera en el municipio de Piedecuesta Santander utilizando la guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del servicio geológico colombiano (SGC).
- Jones, F. O. (1973). Landslides of Rio de Janeiro and the Serra das Araras escarpment, Brazil. Washington, U. S. Geological Survey, 42p.
- Julivert, M. (1958). La Morfoestructura de la Zona de las Mesas al SW de Bucaramanga (Colombia S. A.). Bucaramanga.

Lizarralde, J. A. (1995). Estabilidad de taludes y laderas en carreteras. Subdirección de Conservación, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías. Santafé de Bogotá, 59p.

MAVDT - Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2005). Guía Metodológica 1 - Incorporación de la prevención y la reducción de riesgos en los procesos de ordenamiento territorial. Dirección de Desarrollo Territorial, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá, mayo de 2005, 101p.

Minambiente – Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2014). Protocolo para la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas. Ministerio de Ambiente - Ministerio de Hacienda - Fondo Adaptación. Bogotá, D. C., noviembre de 2014, 122p.

Ministerio del Interior (2012). Ley 1523 de 2012 - Ley Sistema Nacional de Gestión del Riesgo. Por la cual se adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. Cartilla. Bogotá, D.C., abril de 2012, 58p.

Mora C., S., and Vahrson, W. G. (1994a). Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination. Association of Engineering Geologists Bulletin, Vol. XXXI, No. 1, 1994, pp. 49-58.

Municipio de Piedecuesta(2001). Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT). Mapa amenazas del sector urbano, escala 1:7.500 (plano 3-12). Elaborado por la División de Asesorías & Estudios Especializados de la UIS. Bucaramanga, diciembre de 2001.

NAVFAC DM 7.02 (1986). Foundations and earth structures, Washington. U.S.A.

Navas, J. (1963) Estudio estratigráfico del Girón al W del Macizo de Santander (Cordillera Oriental). Boletín de Geología. Universidad Industrial de Santander. No. 12, 1963, Bucaramanga, pp. 19-33.

NSR-10 (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. Decreto 926 de marzo 19 de 2010. Elaborado por el Comité AIS-100 de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), con aportes de INGEOMINAS y por encargo de la Comisión Asesora Permanente del Régimen de Construcciones Sismo Resistentes. Publicado en el Diario Oficial No. 47663, Bogotá, D.C., 26 de marzo de 2010, 444p.

Oriente Noticias Canal TRO (2013). Declaran calamidad pública en Piedecuesta tras emergencial invernal. Video publicado en marzo del 2013. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=nvhvr1-vSfE>

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación - FAO (2009). Cambio climático y gestión de riesgos de desastres. Departamento de Gestión de Recursos Naturales y Medio Ambiente. Roma, diciembre de 2009, 2p.

Osorio, S. (2010). Consistencia del Suelo - Límites de Atterberg – Índices. Apuntes de Geotecnia con Énfasis en Laderas. 25 de noviembre de 2010. Disponible en: [http://geotecnia-sor.blogspot.com/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de\\_2498.html](http://geotecnia-sor.blogspot.com/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de_2498.html)

Panizza, M. (1999). Relationships between environment and man in terms of landslides induced risk. En cap. 12 de R. Casale y C. Magottini editores, Floods and landslides, integrate risk assessment. Springer–Verlag, Berlín.

Pennington W.D. (1981). Subduction of the Eastern Panama Basin and seismotectonics of Northwestern South America. Journal of Geophysical Research, v86, p:10753-10770.

Picarelli, L., Oboni, F., Evans, S.G., Mostyn, G., and Fell, R. (2005). Hazard characterization and quantification. En *Memorias, International Conference on Landslide Risk Management*. Vancouver, Canadá, 27–63.

Predecan - Prevención de Desastres en la Comunidad Andina (2009). Guía técnica para la interpretación y aplicación de análisis de amenazas y riesgo para propósitos de planificación y gestión territorial. Resultado 3: planificación y desarrollo. Financiado por la Comisión Europea y la Comunidad Andina. Bogotá, mayo de 2009, 80p.

PrensaPiedecuestana Pta (2015). Obras cerramiento tanque la Cantera acueducto Piedecuesta. Noticia publicada el día 21 de julio de 2015. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=TuySydgT6Os>

Reyes M., G. A. (1998). La ingeniería geoambiental en la prevención de desastres y el desarrollo sostenible. En *memorias del III Seminario Internacional de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible*, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, octubre de 1998, 291-302.

Reyes-Mendoza, G. A. (1998). Updating the DTM-based model for shallow landslide hazard assessment to account for talus deposits, Università degli Studi di Padova, Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Sezione: Laboratorio IDEA (Idrologia, Difesa del Suolo, Ecologia e Ambiente), Legnaro, Padova (Italia), maggio 1998, 22p.

Reyes M., G., y Álvarez B., M. (2007). Bucaramanga. Capítulo del libro *Entorno Natural de 17 Ciudades de Colombia*. Editor Michel Hermelin A. Sociedad Colombiana de Geología – Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Fondo Editorial EAFIT. Medellín, julio de 2007, 89-116.

Reyes M., G. A. (2018). Análisis detallado de los factores de inestabilidad en rocas lodosas y coluviones. Aplicación en la zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa del área urbana de Vélez, Colombia. Capítulo 5 UGI. Tesis doctoral (en edición final) en *Ciencias de la Tierra*. Universidad de Barcelona. Bucaramanga, octubre de 2018, 33p.

Royero, J. M., & Clavijo, J. (2001). Mapa Geológico generalizado departamento de Santander. Escala 1:400.000. Memoria explicativa. INGEOMINAS, Bogotá, p: 17-41. Disponible en: [https://www.academia.edu/26408553/Memoria\\_Explicativa\\_del\\_Departamento\\_de\\_Santander](https://www.academia.edu/26408553/Memoria_Explicativa_del_Departamento_de_Santander)

Sepúlveda J., F. J., y Cabrera Z., F. H. (2018). Tomografía sísmica 3D del nido sísmico de Bucaramanga (Colombia).

Saaty, T. L. (1990). Multicriteria decision making – the analytic hierarchy process. AHP Series, Vol. I, McGrawHill, New York, 1990.

Segoni, S., Leoni, A., Benedetti, I., Catani, F., Righini, G., Falorni, G., Gabellani, S., Rudari, R., Silvestro, F. and Rebori N. (2009). Towards a definition of a real-time forecasting network for rainfall induced shallow landslides. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9, 2009, 2119–2133.

Soeters, R., and Van Westen, C. J. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation. En Turner, K., y Schuster, R.L., ed., *Landslides investigation and mitigation*. National Academy Press, Transportation Research Board Special Report, Washington D. C., 129–177.

SGC - Servicio Geológico Colombiano (2015a). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Escala detallada. Colección guías y manuales. Bogotá, D.C., mayo de 2015. 179p.

SGC - Servicio Geológico Colombiano (2015b). Mapa geológico de Colombia 2015. Escala 1:1.000.000. Compilado por Jorge Gómez Tapias, Nohora Emma Montes Ramírez, Álvaro Nivia Guevara y Hans Diederix. Bogotá, 2015.

SGC - Servicio Geológico Colombiano (2019a). Sistema de Información de Movimientos en Masa – SIMMA. Disponible en: <http://simma.sgc.gov.co/#/public/>

SGC - Servicio Geológico Colombiano (2019b). Mapa de amenaza sísmica y mapa de zonificación de la intensidad sísmica esperada. Disponible en: [http://srvags.sgc.gov.co/JSViewer/Amenaza\\_Sismica/](http://srvags.sgc.gov.co/JSViewer/Amenaza_Sismica/)

Suárez D., J. (2009): Deslizamientos. Análisis Geotécnico Vol. 1, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

Suárez D., J. (1998). Deslizamiento y estabilidad de taludes en zonas tropicales, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 117-150.

Vanguardia.com (2013a). Aumentan los incendios forestales en Piedecuesta. Noticia del miércoles 16 de enero de 2013. Disponible en: <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/piedecuesta/aumentan-los-incendios-forestales-en-piedecuesta-FSVL191620>

Vanguardia.com (2013b). Aumentan los incendios forestales en Piedecuesta. Vanguardia Liberal. Noticia de febrero 15 de 2013. Disponible en: <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/piedecuesta/aumentan-los-incendios-forestales-en-piedecuesta-FSVL191620>

Vanguardia.com (2014). Bariloche II, en riesgo de una nueva emergencia. Vanguardia Liberal. Noticia de 2014. Disponible en: <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/piedecuesta/bariloche-ii-en-riesgo-de-una-nueva-emergencia-CQVL286325>

Vanguardia.com (2015). El AMB hizo mantenimiento en zonas erosivas de Bariloche. Noticia del jueves 6 de julio de 2017. Disponible en: <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/piedecuesta/el-amb-hizo-mantenimiento-en-zonas-erosivas-de-bariloche-BFVL402641>

Vanguardia.com (2017). Hacen empradización de talud en Bariloche II etapa. Noticia del miércoles 23 de septiembre de 2015. Disponible en: <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/piedecuesta/hacen-empradizacion-de-talud-en-bariloche-ii-etapa-MCVL328848>

Vanguardia.com (2018a). Controlan incendio en Cerro de la Cantera de Piedecuesta. Vanguardia Liberal. Noticia de febrero 10 de 2018. Disponible en: <https://www.vanguardia.com/judicial/controlan-incendio-en-cerro-de-la-cantera-de-piedecuesta-MDVL424181>

Vanguardia.com (2018b). 600 familias están en riesgo por inminente deslizamiento en Piedecuesta. Noticia del 9 de diciembre de 2018. Disponible en: <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/piedecuesta/600-familias-estan-en-riesgo-por-inminente-deslizamiento-en-piedecuesta-CCVL452572>

Vanguardia.com (2019a). De visita por mi barrio: Hoy, Bariloche de Piedecuesta. Noticia del 9 de agosto de 2019. Disponible en: <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/de-visita-por-mi-barrio-hoy-bariloche-de-piedecuesta-YH1283001>

Vanguardia.com (2019b). Talud amenaza con destruir 72 viviendas del barrio Bariloche en Piedecuesta. Vanguardia Liberal. Noticia del 13 enero de 2019. Disponible en: <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/piedecuesta/talud-amenaza-con-destruir-72-viviendas-del-barrio-bariloche-en-piedecuesta-ja255821>

Vargas C., G. (1999). Guía técnica para la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza por movimientos en masa. Cooperación Colombo-Alemana. Proyecto Río Guatiquía. Villavicencio, diciembre de 1999, 197p.

- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. In landslides, analysis and control. Schuster, L. L. and Krinzk, R. J., editors. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report, No. 176. Washington, D.C., 1978, 11-33.
- Ward, D. E., Goldsmith, R., Jimeno V., A., Cruz B., J., Restrepo, H. y Gómez R., E. (1977). Mapa geológico del cuadrángulo H-12, Bucaramanga. Escala 1:100.000. Instituto de Investigaciones e Información geocientífica minero-ambiental y nuclear (Ingeominas), con la colaboración del U.S. Geological Survey. Convenio 514-L-030 de la A.I.D. Digitalización y edición por la Unidad de Producción de Documentos Digitales. Ingeominas, Bogotá, 2000.
- Wikipedia.com (2019). Historia de Piedecuesta. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Mapa\\_del\\_%C3%A1rea\\_metropolitana\\_de\\_Bucaramanga.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Mapa_del_%C3%A1rea_metropolitana_de_Bucaramanga.svg)
- Wincander, R., and Monroe, J. (2000). Fundamentos de geología. Segunda Ed., editorial Thomson, México, 2000, 445p.
- Youtube.com (2013). Piedecuestanos buscan recuperarse tras estragos por lluvias. Video publicado el 6 mar. 2013. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=cFHyVdZBqSY>