

**EMPRESA DE DESARROLLO URBANO (EDU)-
UNIVERSIDAD EAFIT**

Contrato AP 396 de 2017

Estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo de detalle para los circuitos Los Mangos, El Corazón y Santo Domingo, en el municipio de Medellín.

**INFORME
POLÍGONO BETANIA**

CIRCUITO EL CORAZÓN

Julio de 2018

Versión 9

CONTROL DE VERSIÓN			
Versión	Fecha	Capítulo Modificado	Descripción
0	07/12/2017	No Aplica	Revisión de información secundaria
1	29/12/2017	No Aplica	Localización área de estudio, definición de las UMIs y ubicación de sondeos exploratorios del polígono.
2	15/01/2018	Numeral 6.1 Definición de la UMI	Geología y geomorfología regional y análisis de fotointerpretación del polígono Betania.
3	07/02/2018	Numeral 6.1 Definición de la UMI	Geología y geomorfología local del polígono Betania. Fragilidad del polígono Betania.
4	15/03/2018	Varios	Amenaza, vulnerabilidad y Riesgo. Recomendaciones
5	11/04/2018	Varios (Capítulos 9, 10 y 11)	Correcciones interventoría

6	23/04/2018	Varios	Correcciones interventoría amenaza, vulnerabilidad y riesgo. Aspectos hidrogeológicos Aptitud Geológica
7	01/06/2018	Varios	Correcciones interventoría amenaza, vulnerabilidad y geotecnia.
8	18/06/2018	Varios	Correcciones Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo.
9	06/07/2018	Numeral 9.1.1.2	Corrección amenaza en condiciones pseudo – estáticas

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	2
3. METODOLOGÍA	3
3.1. CARTOGRAFÍA ESCALA DE TRABAJO	3
3.2. AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA.....	3
3.2.1. Recopilación de información secundaria y productos base	3
3.2.2. Visitas de reconocimiento.....	3
3.2.3. Generación de mapas temáticos	4
3.2.4. Exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio	5
3.2.5. Estratigrafía y definición de parámetros geomecánicos	6
3.2.6. Definición de los modelos geológico – geotécnicos.....	7
3.2.7. Evaluación de la estabilidad.	7
3.2.8. Análisis de la distancia de viaje	8
3.2.9. Zonificación de la amenaza por movimientos en masa	9
3.3. ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD	9
3.3.1. Fichas de levantamiento de la información.....	10
3.3.2. Trabajo de campo.....	10
3.3.3. Análisis de la información	11
3.4. VULNERABILIDAD EN LAS CONSTRUCCIONES.....	11

3.4.1. Cálculo de la fragilidad	11
3.4.2. Intensidad de los movimientos en masa lentos en edificaciones.....	12
3.4.3. Intensidad de los movimientos en masa rápidos en edificaciones.....	12
3.5. VULNERABILIDAD EN LAS LÍNEAS VITALES	13
3.5.1. Fragilidad en líneas vitales	13
3.5.2. Intensidad en líneas vitales para movimientos en masa lentos	14
3.5.3. Intensidad en líneas vitales para movimientos en masa rápidos	15
3.6. VULNERABILIDAD EN LAS PERSONAS	15
3.7. CÁLCULO Y ZONIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	16
3.8. EVALUACIÓN DEL RIESGO	17
3.8.1. Riesgo por Elementos Expuestos.....	17
3.8.2. Riesgo por Polígono.	18
4. REVISIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA	19
5. CARACTERÍSTICAS GENERALES	23
5.1. GEOLOGÍA REGIONAL.....	23
5.1.1 Estratigrafía	25
5.2. GEOMORFOLOGIA REGIONAL	27
5.2.1. Valle de Aburrá Medio (VM)	28
5.3. TECTÓNICA REGIONAL	33
5.3.1. Sistema de Fallas	33
6. CONDICIONES GEOLÓGICAS LOCALES DEL POLÍGONO BETANIA	34
6.1 DEFINICIÓN DE LA UMI.....	34

6.2	FOTOINTERPRETACIÓN.....	37
6.3	UNIDADES GEOLÓGICAS PARA INGENIERÍA	44
6.3.1	Derivados de roca in situ	47
6.3.2	Depósitos antrópicos	50
6.4	MORFOMETRÍA	51
6.5	GEOMORFOLOGÍA LOCAL	57
6.5.1	Bloque Itagüí – San Cristóbal	60
6.6	MORFODINÁMICA	66
6.6.1	Reporte histórico de eventos	66
6.6.2	Identificación de procesos morfodinámicos	69
6.7	SUELOS DE PROTECCIÓN Y USO GENERAL DEL SUELO.....	73
7.	ASPECTOS GEOTÉCNICOS	77
7.1	EXPLORACION DE CAMPO	77
7.2	RESULTADOS Y ANALISIS DE LABORATORIO.....	80
7.3	ANALISIS GEOTECNICO	82
7.3.1	Estratigrafía y definición de parámetros geomecánicos	82
7.3.2	Definición de modelos geológico-geotécnicos.....	90
7.3.3	Análisis de estabilidad condición actual.....	92
8.	ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS	102
8.1	MODELO HIDROGEOLÓGICO REGIONAL.....	102
8.2	PERMEABILIDAD	105
8.3	EVALUACION DE DRENAJE SUPERFICIAL	106

8.4	CALCULO DEL PERIODO DE RETORNO DE ACUERDO A LOS MOVIMIENTOS EN MASA	107
9.	ZONIFICACIÓN DE AMENAZA	109
9.1	AMENAZAS POR MOVIMIENTOS EN MASA	109
9.1.1	Amenaza por estabilidad	109
9.1.1.1	Amenaza en condiciones actuales estáticas	110
9.1.1.2	Amenaza en condiciones seudo – estáticas.....	113
9.1.1.3	Amenaza en condiciones saturadas.....	115
9.1.2	Amenaza por Run-Out.....	117
9.1.3	Amenaza total.....	119
10.	VULNERABILIDAD.....	123
10.1	ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS CONSTRUCCIONES POR MOVIMIENTO EN MASA.....	123
10.1.1	Cálculo de la fragilidad de las construcciones	123
10.1.2	Cálculo de la intensidad sobre las construcciones.	128
10.1.3	Cálculo de la vulnerabilidad de las construcciones	131
10.2	ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS LÍNEAS VITALES POR MOVIMIENTO EN MASA.....	133
10.2.1	Cálculo de la fragilidad de la línea vital – energía	133
10.2.2	Cálculo de la intensidad de la línea vital – energía	135
10.2.3	Cálculo de la vulnerabilidad de la línea vital – energía.....	137
10.2.4	Cálculo de la fragilidad de la línea vital – vías.....	139
10.2.5	Cálculo de la intensidad de la línea vital – vías	141
10.2.6	Cálculo de la vulnerabilidad de la línea vital – vías	143

10.2.7	Cálculo de la fragilidad del acueducto	145
10.2.8	Cálculo de la intensidad del acueducto	147
10.2.9	Cálculo de la vulnerabilidad del acueducto	149
10.2.10	Cálculo de la fragilidad del alcantarillado	151
10.2.11	Cálculo de la intensidad del alcantarillado.....	153
10.2.12	Cálculo de la vulnerabilidad del alcantarillado.....	155
10.3	VULNERABILIDAD DE PERSONAS POR MOVIMIENTOS EN MASA ...	157
10.3.1	Análisis de vulnerabilidad de personas.	157
10.4	DESCRIPCIÓN DE PROBLEMAS ENCONTRADOS EN LAS CONSTRUCCIONES.....	157
11.	ZONIFICACIÓN DE RIESGO	159
11.1	RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA	159
11.1.1	Riesgo de elementos expuestos	159
11.1.2	Riesgo por polígono	170
12.	APTITUD GEOLÓGICA.....	174
13.	RECOMENDACIONES	177
13.1	RECOMENDACIONES GEOTÉCNICAS	177
13.1.1	Análisis de estabilidad condición proyectada	178
13.2	DIMENSIONAMIENTO GEOTÉCNICO DE OBRAS	182
13.2.1	Pilas correspondientes a la cimentación de los muros.....	185
13.2.2	Plan de Seguimiento y Monitoreo.....	192
13.3	RECOMENDACIONES PARTICULARES EXCAVACION DE PILAS	193
13.3.1	Viviendas afectadas por obras propuestas.....	195

13.4	RECOMENDACIONES GENERALES	195
13.4.1	Modificaciones del terreno.....	196
13.4.2	Control de drenaje.....	199
13.5	RECOMENDACIONES VULNERABILIDAD.	204
13.5.1	Servicios públicos domiciliarios	204
13.5.2	Líneas vitales – energía y alumbrado público	205
13.5.3	Vías de acceso y obras de drenaje	205
13.5.4	Mejoramiento saludable	205
13.5.5	Mejoramiento locativo.....	205
13.6	OTRAS RECOMENDACIONES.....	206
14.	CONCLUSIONES.....	208
15.	LIMITACIONES	210
16.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	212

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización del polígono Betania	2
Figura 2. Mapa geológico regional circuito Corazón (Tomado de AMVA (2007) y AMVA – Alcaldía de Medellín (2017)).....	24
Figura 3. Mapa regional de macrounidades de del circuito Corazón (Tomado de AMVA, 2007)	29
Figura 4. Mapa geomorfológico regional circuito Corazón (AMVA, 2007)	32
Figura 5. Localización de la UMI del polígono Betania	36
Figura 6. Fotografía aérea de 1943, polígono Betania	38
Figura 7. Fotografía aérea de 1969, polígono Betania	39
Figura 8. Fotografía aérea de 1989, polígono Betania	41
Figura 9. Fotografía aérea de 1994, polígono Betania	42
Figura 10. Fotografía aérea de 2010.	43
Figura 11. Geología local del polígono Betania	45
Figura 12. Perfil geológico del polígono Betania – sector sur (Polígono 7003-1)	46
Figura 13. Perfil geológico del polígono Betania – sector norte (Polígono 1312-1) .	47
Figura 14. Stock de Altavista: saprolito o nivel IC en inmediaciones de la cancha..	48
Figura 15. Saprolito del stock de Altavista en las perforaciones 2 y 3	49
Figura 16. Stock de Altavista en la perforación 4, a la profundidad de 7 m	50
Figura 17. Características de los materiales que conforman el lleno antrópico, sector de la cancha del Barrio Betania.....	51
Figura 18. Mapa de morfometría del polígono Betania.....	53

Figura 19. Unidad con pendientes en el rango entre 0 -10%, sector de la placa polideportiva	54
Figura 20. Zonas con pendientes en el rango entre 10% – 25%, polígono 7003-1 .	55
Figura 21 Sector occidental de la placa polideportiva, zona con pendientes en el rango entre 25% - 40%.....	55
Figura 22. (a) Parte posterior del parque infantil en el Polígono 7003-1, (b) zona de viviendas del polígono 1213-1, con pendientes en el rango 40% - 60%	56
Figura 23. (a), vertiente posterior a las viviendas, (b) vertiente noroccidental de la placa polideportiva, corresponden a zonas con pendientes en el rango 60%	57
Figura 24. Mapa geomorfológico local del polígono Betania.	59
Figura 25. Ladera convexa, corta y suave.....	60
Figura 26. Ladera cóncava corta y muy inclinada	61
Figura 27. Ladera cóncava corta y abrupta	62
Figura 28. Ladera cóncava, corta y muy abrupta	63
Figura 29. Ladera en lleno, recta, corta y muy suave, placa polideportiva del barrio Betania	64
Figura 30. Unidad Ladera en lleno recta corta y suave	64
Figura 31. Ladera cóncava, corta y muy inclinada	65
Figura 32. Ladera en lleno cóncava corta y abrupta	66
Figura 33. Eventos reportados por el DAGRD (Octubre de 2016).....	68
Figura 34. Reporte eventos DAGRD para el polígono Betania.....	69
Figura 35. Procesos morfodinámicos en el polígono Betania.....	71
Figura 36. (a) Zona de proceso activo, sector la cancha. (b) Cicatriz de deslizamiento a la altura de calle 34, (c) Muro de gaviones deformado	72

Figura 37. Clasificación del suelo, polígono Betania. Tomado de Acuerdo 48 de 2014.	74
Figura 38. Mapa de usos del suelo del polígono Betania. Tomado de Acuerdo 48 de 2014.	76
Figura 39. Localización sondeos exploratorios polígono Betania.	78
Figura 40. Muestreador estándar para el ensayo SPT	80
Figura 41. Muestreador de pared delgada	80
Figura 42. Modelo geológico- geotécnico perfil 1 Betania	91
Figura 43. Modelo geológico-geotécnico perfil 2 Betania	92
Figura 44. Análisis de estabilidad perfil 1 condición actual.	96
Figura 45. Análisis estabilidad perfil 1 condición actual pseudo-estática.	97
Figura 46. Análisis estabilidad perfil 1 condición actual saturada.	98
Figura 47. Análisis estabilidad Perfil 2 situación actual, condición estática.	99
Figura 48. Análisis estabilidad perfil 2 condición pseudo-estática.	100
Figura 49. Análisis estabilidad perfil 2 condición saturada.	101
Figura 50. Unidades hidrogeológicas para el Valle de Aburrá, modificado de AMVA 2013.	104
Figura 51. Mapa de amenaza por estabilidad del polígono de Betania.	111
Figura 52. Mapa de amenaza por estabilidad en condición pseudo-estática del polígono de Betania.....	114
Figura 53. Mapa de amenaza por estabilidad en condición saturada del polígono de Betania.	116
Figura 54. Mapa amenaza Runout	118
Figura 55. Mapa de amenaza total del polígono de Betania	121

Figura 56. Distribución espacial de la fragilidad de las construcciones por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.	125
Figura 57. Tipología estructuras ligeras (E). Construcción ubicada en el polígono Betania.	126
Figura 58. Tipología estructuras simples (F). Construcción ubicada en el polígono Betania.	127
Figura 59. Tipología estructuras con confinamiento deficiente e híbridas (D). Estructura ubicada en el polígono Betania.	128
Figura 60. Distribución espacial de la intensidad de las construcciones por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.	130
Figura 61. Distribución espacial de la vulnerabilidad de las construcciones por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.	132
Figura 62. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital energía por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.	134
Figura 63. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital energía por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.	136
Figura 64. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital energía por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.	138
Figura 65. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital vías por movimiento en masa, identificadas en el polígono Betania.	140
Figura 66. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital vías por movimiento en masa, identificadas en el polígono Betania.	142
Figura 67. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital vías por movimiento en masa, identificadas en el polígono Betania.	144
Figura 68. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital acueducto por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.	146
Figura 69. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital acueducto por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.	148

Figura 70. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital acueducto por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.	150
Figura 71. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital alcantarillado por movimiento en masa, identificadas en el polígono Betania.	152
Figura 72. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital alcantarillado por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.	154
Figura 73. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital alcantarillado por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.	156
Figura 74. Distribución espacial del riesgo de las construcciones por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.	161
Figura 75. Distribución espacial del riesgo de la línea vital energía por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.	163
Figura 76. Distribución espacial del riesgo de la línea vital vía por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.	165
Figura 77. Distribución espacial del riesgo de la línea vital acueducto por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.	167
Figura 78. Distribución espacial del riesgo de la línea vital alcantarillado por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.	169
Figura 79. Mapa de riesgo por polígono del polígono Betania	172
Figura 80. Mapa de Aptitud geológica para el polígono Betania	176
Figura 81. Análisis estabilidad perfil 1 Alternativa recomendada, condición estática.	179
Figura 82. Análisis estabilidad perfil 1 Alternativa recomendada, condición pseudo-estática	180
Figura 83. Análisis estabilidad perfil 2. Solución final condición estática.....	181
Figura 84. Análisis estabilidad perfil 2. Solución final, condición pseudo-estática.	182

Figura 85 Localización de las obras proyectadas polígono Betania.....	184
Figura 86. Capacidad de carga vertical y resistencia al levantamiento Muro superior Perfil 1.....	186
Figura 87. Asentamientos estimados Pilas muro superior perfil 1	187
Figura 88. Capacidad de carga vertical y resistencia al levantamiento Muro inferior Perfil 1.....	188
Figura 89. Asentamientos estimados Pilas muro inferior perfil 1	188
Figura 90. Análisis lateral de las pilas Muro superior Perfil 1.....	191
Figura 91. Análisis capacidad lateral de las pilas Muro inferior Perfil 1.....	192
Figura 92. Construcción de una pila in-situ.	194
Figura 93. Recomendaciones para modificaciones del talud e implantación de viviendas.	197
Figura 94. Esquema de recomendaciones para taludes	198
Figura 95. Características de las cunetas	199
Figura 96. Forma de construcción de las cunetas propuestas	200
Figura 97. Esquema de bajantes.....	200
Figura 98. Características de los filtros propuestos.....	202

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Regla de decisión para el riesgo individual. Modificado de Phoon (2008) citado por Alcaldía de Medellín (2015).	17
Tabla 2.	Regla de decisión para el riesgo por polígono para movimientos en masa.	18
Tabla 3.	Clasificación geomorfológica regional.	28
Tabla 4.	Fotografías aéreas empleadas para el proceso de fotointerpretación	37
Tabla 5.	Distribución de la variable pendientes	52
Tabla 6.	Clasificación geomorfológica del polígono Betania	57
Tabla 7.	Localización geográfica de los sondeos.	77
Tabla 8.	Numero de sondeos exploratorios y longitud alcanzada.	79
Tabla 9.	Tipos de ensayos y cantidad de muestras analizadas.	81
Tabla 10.	Resumen de los ensayos de laboratorio.	81
Tabla 11.	Correlaciones utilizadas para la definición de parámetros geomecánicos.	86
Tabla 12.	Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio del lleno antrópico.	87
Tabla 13.	Parámetros geomecánicos del lleno antrópico	87
Tabla 14.	Parámetros geomecánicos del lleno antrópico	88
Tabla 15.	Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio saprolito	89
Tabla 16.	Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio del saprolito IC.	89
Tabla 17.	Parámetros estadísticos saprolito IC.	89

Tabla 18. Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio Transición suelo roca IIA.	90
Tabla 19. Factores de seguridad para el análisis de estabilidad (Tomado de Tabla H.2.4-1. NSR-10 Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos).....	93
Tabla 20 Coeficientes sísmicos para las diferentes zonas homogéneas.	94
Tabla 21. Valores de KST/amax.....	94
Tabla 22. Unidades hidrogeológicas en la zona de estudio (Modificado de AMVA, 2013)	102
Tabla 23. Valores relativos de permeabilidad. (Fuente: Terzaghi K y Peck R, 1980)	106
Tabla 24. Estaciones de precipitación usadas para el análisis de lluvia detonante.	107
Tabla 25. Estaciones de precipitación con curvas IDF.	107
Tabla 26. Periodos de retorno asociados a las lluvias máximas diarias de los años 2010 y 2011.....	108
Tabla 27. Regla de decisión para el riesgo individual. Modificado de Phoon (2008) citado por Alcaldía de Medellín (2015).	159
Tabla 28. Regla de decisión para el riesgo por polígono para movimientos en masa.	170
Tabla 29 Capacidad de carga vertical, resistencia al levantamiento y asentamientos pilas de fundación muro de contención.	186
Tabla 30 Capacidad de carga vertical y asentamientos pilas de fundación muro de contención.	187
Tabla 31 Cargas estimadas para los diferentes casos analizados.....	190
Tabla 32 Resultados Obtenidos Interacción suelo-estructura	191
Tabla 33 Resultados Obtenidos Interacción suelo-estructura	192
Tabla 34. Viviendas afectadas por obras en el polígono Betania.....	195

LISTA DE ANEXOS

- Anexo 1. Metodología
- Anexo 2. Registros de perforación
- Anexo 3. Resultados de laboratorio
- Anexo 4. Memorias de cálculo geotécnico
- Anexo 5. Fichas de vulnerabilidad
- Anexo 6. Memorias de cálculo y diseños estructurales

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio hace parte de las acciones del programa de Empresas Públicas de Medellín denominado “Unidos por el Agua”, el cual busca mejorar la calidad de vida de un número importante de familias, ubicadas algunas de ellas, en asentamientos informales, a partir del acceso a los servicios de acueducto y alcantarillado y la mitigación del riesgo geológico e hidrológico.

Este informe, corresponde a los estudios de detalle requeridos para las zonas de condición de riesgo por el Decreto Nacional 1077 de 2015 y por el Decreto Municipal 1626 de 2015, e igualmente recoge el Decreto Metropolitano 09 del 25 de mayo de 2012. Las áreas objeto de este análisis, se localizan en los denominados circuitos Los Mangos, Santo Domingo y El Corazón, ubicados en la zona Centro Oriental, Nororiental y centro Occidental del municipio de Medellín.

Los tipos de amenaza evaluada en las áreas de interés, corresponden a movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales. Para el polígono denominado Betania, la amenaza que define la condición de riesgo en el Acuerdo 48 de 2014 – POT, corresponde a movimientos en masa, amenaza que fue evaluada en detalle en el presente estudio.

Además de la amenaza, se evaluó la vulnerabilidad física de acuerdo a las características de los elementos expuestos, (construcciones y líneas vitales), a partir de la definición de la fragilidad y la intensidad de los fenómenos que los podrían afectar.

Igualmente, se evaluó el riesgo, integrando la información de la amenaza y la vulnerabilidad. Este riesgo se determinó a nivel de cada elemento expuesto y a nivel de polígono, determinando de esta manera los polígonos de riesgo alto no mitigable, riesgo alto mitigable, riesgo medio y riesgo bajo.

Finalmente, de acuerdo a las condiciones encontradas en cada polígono, se definieron las acciones estructurales y no estructurales necesarias para la mitigación del riesgo y que una vez ejecutadas y monitoreadas permitirán reducir la amenaza o la vulnerabilidad y cambiar el nivel de riesgo.

2. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se ubica sobre la vertiente occidental del valle medio del río Aburrá; hace parte de la Comuna 13 del municipio de Medellín, y está conformado por dos polígonos, el 1312 - Betania y el 7003-1 denominado El Corazón – El Morro. El primero corresponde a un área en forma de triángulo que forma la calle 34 con la carrera 107, con un área de 0,14 ha. El segundo polígono se ubica entre la calle 33B y el camino que corresponde a la prolongación de la calle 33A, entre la carrera 106 y el costado noroccidente de la placa polideportiva, este polígono tiene un área de 0,50 hectáreas (Figura 1) e incluye las áreas con condición de riesgos denominadas en el POT con los códigos 1312-1 y 7003-1 incluidos dentro del denominado Circuito El Corazón.

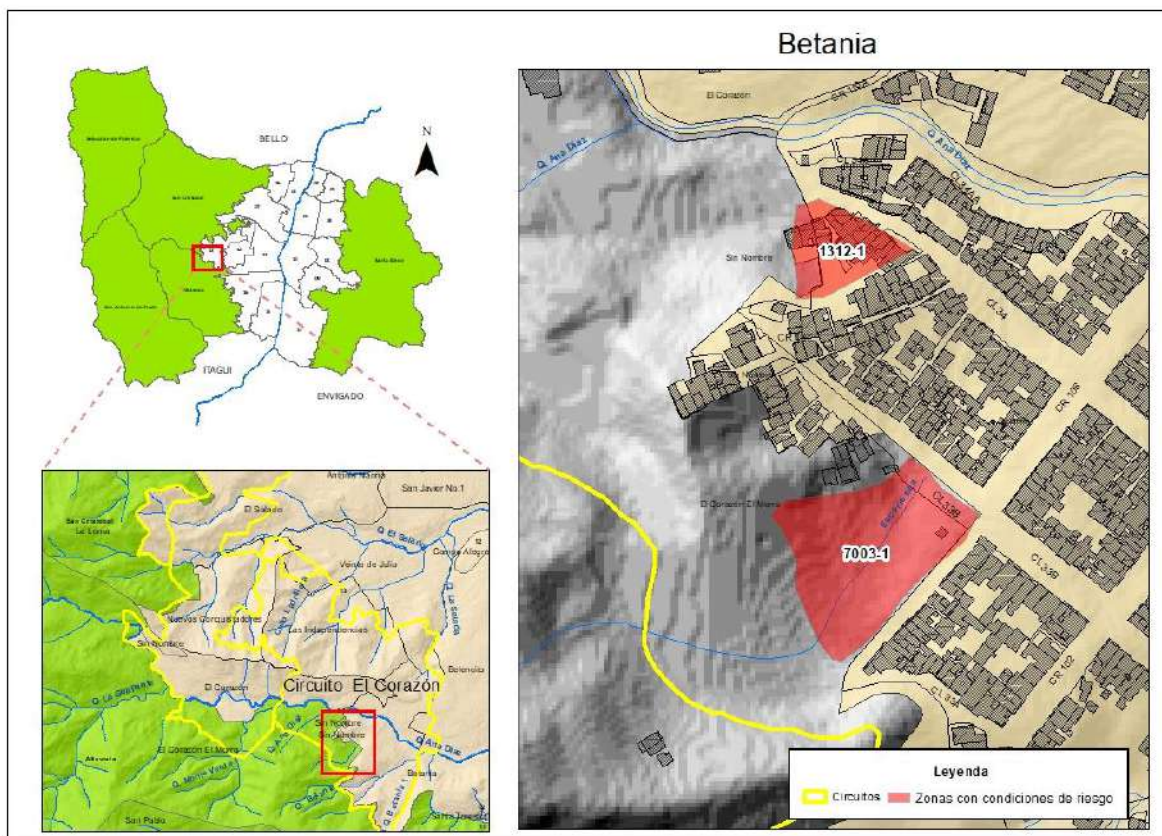


Figura 1. Mapa de localización del polígono Betania

3. METODOLOGÍA

Los procedimientos seguidos para realizar los estudios de riesgo de detalle por movimientos en masa, con sus respectivas medidas de intervención, se describen con detalle en el Anexo 1 “Documento metodológico”.

Cada componente tiene su propia metodología, la cual se describe brevemente a continuación.

3.1. CARTOGRAFÍA ESCALA DE TRABAJO

De acuerdo al decreto nacional 1077 de 2015 y al decreto municipal 1626 de 2015, para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa se utilizó la escala 1:2.000, específicamente se tuvo en cuenta la información de la restitución de la EDU, la información del POT de Medellín y levantamientos puntuales donde no se contó con esta.

3.2. AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

El propósito de este capítulo consiste en la definición de la metodología empleada para generar los mapas de zonificación de amenazas por fenómenos de remoción en masa mediante la utilización de métodos determinísticos, y cuyos procesos principales consisten en los siguientes: generación de mapas temáticos, exploración del subsuelo, estratigrafía, análisis de estabilidad y evaluación de la amenaza. A continuación se explican cada uno de estos procesos:

3.2.1. Recopilación de información secundaria y productos base

En esta fase inicial se acopió y revisó la información disponible para la caracterización geológica y geomorfológica del área de interés. Los estudios de Microzonificación sísmica detallada realizados para Medellín y su área metropolitana, son la base para los análisis geológicos locales, además de otros informes realizados por diferentes entidades como se sintetiza en el capítulo 4.

3.2.2. Visitas de reconocimiento.

Con el objeto de realizar un reconocimiento de los sectores o polígonos con “condición de riesgo” a estudiar, se realizó una visita de reconocimiento con funcionarios del Departamento Administrativo de Planeación Municipal, la EDU, la

Interventoría y profesionales de la Universidad. En estas visitas se discutió la delimitación de las unidades morfodinámicas independientes UMI con base en los criterios definidos por el Acuerdo Metropolitano 009 de 2012 y la ubicación de las perforaciones y sus cantidades, se dieron las recomendaciones sobre cada uno de los polígonos en función de sus características particulares y se plantearon acciones generales a ejecutarse por parte de la Universidad.

3.2.3. Generación de mapas temáticos

Durante este proceso se recopiló la información cartográfica disponible sobre cada uno de los mapas temáticos o mapas índices empleados en el desarrollo de esta metodología, los cuales en este caso correspondieron a geología y formaciones superficiales, geomorfología, pendiente y procesos morfodinámicos.

Las UMI fueron delimitadas por el grupo de profesionales del proyecto de las áreas de geología, geomorfología, geotecnia, hidrología e hidráulica a la escala de trabajo, de acuerdo a los lineamientos establecidos en el Acuerdo Metropolitano 009 de 2012.

Geología y formaciones superficiales: para el desarrollo de esta variable fue necesaria la realización de un mapa preliminar, para el cual se utilizó como insumo base la cartografía geológica existente a escala 1:10.000 del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), la cual fue actualizada y redelimitada con base en la información obtenida del análisis de sensores remotos y la interpretación fotografías aéreas donde fue posible identificar unidades principalmente cuaternarias y estructuras geológicas.

Durante el trabajo de campo y con el objetivo de obtener información de detalle del suelo y subsuelo para la zonificación de amenazas en el área de estudio, se realizó la caracterización y mapeo de las unidades geológicas y formaciones superficiales a escala 1: 2.000 a partir del mapa preliminar, de acuerdo a la disponibilidad de afloramientos y los sondeos exploratorios. La clasificación de las unidades de suelo y definición del grado de meteorización de la roca se basó en el perfil de meteorización de Deere & Patton (1971).

Geomorfología: la construcción de los mapas geomorfológicos primero correspondió a la generación de un mapa preliminar donde se delimitaron los elementos geomorfológicos usando la información básica disponible como información secundaria, análisis de sensores remotos y fotografías aéreas, mapas topográficos, mapa de pendientes y un modelo de elevación digital (MED).

La caracterización y jerarquización geomorfológica se basó en la definición presentada en el estudio “Microzonificación sísmica detalladas del Valle de Aburrá, a escala 1:10.000” (AMVA, 2007). Para la caracterización de la morfología de los elementos geomorfológicos, se utilizaron los atributos de inclinación, longitud y forma de la ladera.

Morfometría: para este estudio de amenaza por movimientos en masa a escala detallada se utilizó la pendiente como variable morfométrica. La definición del mapa de pendientes se realizó en porcentajes, que representa la tangente del ángulo de inclinación del terreno.

Inventario de movimientos en masa: para la generación del mapa de amenaza por movimientos en masa, la cartografía de los procesos morfodinámicos ocurridos en el área de estudio representa uno de los insumos básicos con el fin de identificar las condiciones dinámicas, la continuidad y recurrencia de eventos y su distribución dentro de cada zona.

Para el desarrollo de esta variable fue igualmente necesaria la realización de un mapa preliminar, en donde se incluyeron los procesos morfodinámicos identificados a partir del análisis de fuentes secundarias como bases de datos del DAGRD, SIMMA, Desinventar, Planeación Municipal y demás estudios que se han realizado en la zona. Adicionalmente, se incluyeron los procesos identificados durante la etapa de análisis de sensores remotos.

Este mapa preliminar fue verificado, ajustado y redefinido de acuerdo con las condiciones actuales vistas durante el trabajo de campo. El producto final es la distribución espacial de los movimientos, representados por áreas afectadas o polígonos.

3.2.4. Exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio

La exploración del subsuelo se realizó a partir de métodos directos e indirectos. Exploración directa: el programa de exploración del subsuelo para conocer las condiciones geotécnicas se realizó de acuerdo a la extensión de cada sector y a las problemáticas detectadas, las cuales alcanzaban profundidades que permitían generar el modelo geológico – geotécnico para la evaluación de la estabilidad y determinación de la amenaza por movimientos en masa.

La metodología de exploración consistió en la ejecución de perforaciones de pequeño diámetro (entre 65 y 100 mm). En los sondeos exploratorios se ejecutó el ensayo de penetración estándar (SPT) a intervalos de 1.0 m en los materiales de

suelo, donde esto fuera posible y se recuperaron muestras remoldeadas tomadas con muestreador estándar “Split Spoon”; adicionalmente se obtuvieron muestras inalteradas con tubo de pared delgada “Shelby”. Los materiales encontrados fueron debidamente caracterizados para elaborar columnas estratigráficas utilizadas posteriormente para correlacionar la distribución espacial de los materiales.

Exploración indirecta: las técnicas de geofísica aplicadas estaban orientadas a distinguir o reconocer formaciones geológicas que se encontraban en profundidad mediante la medición de un parámetro físico asociado a ellas: la densidad, la velocidad de las ondas elásticas, la resistividad eléctrica, etc. La prueba utilizada en algunos polígonos de estudio fue la conocida como MASW 2D (Análisis multicanal de onda superficial) la cual sirvió para determinar el perfil de velocidad de las ondas de corte Vs.

Resultados y análisis de laboratorio: las muestras recuperadas en campo fueron clasificadas visualmente en el momento de ejecución de los sondeos para posteriormente ser enviadas al laboratorio, donde el geólogo responsable del proyecto las revisó, evaluó, caracterizó y correlacionó con respecto a la información recuperada en campo, con la finalidad de definir las muestras representativas de cada unidad estratigráfica, a las cuales se les practicaron los ensayos de identificación de sus propiedades de estado (humedad natural – límites de consistencia – índice de plasticidad), y parámetros de resistencia (compresión simple o confinada y corte directo).

A las muestras alteradas se les realizaron ensayos de límites de plasticidad, granulometría y humedad natural, con el fin de obtener su clasificación con base en el sistema USCS.

3.2.5. Estratigrafía y definición de parámetros geomecánicos

De acuerdo a la información de campo obtenida de la exploración geotécnica, los recorridos de los geólogos y los análisis de laboratorio, se levantó la estratigrafía del sector y a las unidades se les asignaron los parámetros geotécnicos.

Estratigrafía: concluida la etapa de exploración del subsuelo, la revisión y agrupación de muestras y los ensayos de laboratorio, se ajustaron y complementaron los perfiles topográficos representativos de la estructura del terreno por medio de la definición de columnas estratigráficas en cada sondeo y su posterior correlación de acuerdo a las observaciones en campo y el criterio de los profesionales involucrados.

Parámetros geomecánicos: la definición de estos parámetros se realizó a partir de la información recolectada de los sondeos exploratorios, del análisis de las muestras extraídas en cada uno de ellos, de las pruebas en campo y laboratorio como la prueba SPT adelantada in-situ y los ensayos de caracterización como granulometrías, límites de Atterberg, humedad natural y corte directo, de acuerdo a los estratos identificados. Al analizar esta información en conjunto fue posible conocer las propiedades del suelo de manera aproximada.

Con la información anterior y con los resultados de los ensayos de laboratorio se procedió a la definición de los parámetros para cada estrato, ajustándose además con los resultados de la modelación de la problemática que se presentaron en campo y que se evidenciaron durante los recorridos del equipo técnico. En cada uno de los casos se obtuvo un valor promedio, mínimo y máximo de cohesión y ángulo de fricción para cada correlación utilizada, obteniendo a partir de su análisis los parámetros geomecánicos característicos para cada material.

3.2.6. Definición de los modelos geológico – geotécnicos

Con base en la determinación de la estratigrafía para cada perfil topográfico seleccionado por parte de los geólogos, se plasmaron las condiciones geomecánicas de los diferentes estratos que componen cada uno de los polígonos, incluyendo en el mismo, los parámetros anteriormente definidos, al igual que las condiciones de nivel freático.

3.2.7. Evaluación de la estabilidad.

Para el análisis de estabilidad se utilizó el software Slide v 6.0 basado en la teoría del equilibrio límite, el cual calcula por diferentes métodos (Morgenstern and Price, Spencer, Janbu, Bishop, etc) los factores de seguridad más críticos para diferentes superficies de falla en el talud.

Para efectos de determinar las características topográficas de los taludes a evaluar, se levantaron secciones topográficas, sobre las cuales se plasmaron las condiciones estratigráficas y geomecánicas de los diferentes estratos que componen cada uno de los sectores.

Para evaluar la estabilidad de cada sector se consideraron tres situaciones: inicialmente se analizó el modelo para el caso estático, seguidamente se realizó el análisis bajo consideraciones normales y extremas de lluvia y posterior a esto se evaluó el comportamiento del terreno bajo solicitaciones sísmicas, obteniendo los

factores de seguridad de cada superficie de falla, verificando el cumplimiento de los valores mínimos planteados por el decreto municipal 1626 de 2015

La condición sísmica se simuló considerando la actuación de fuerzas sísmicas que dependen del coeficiente de aceleración pico efectiva (A_a) dado para cada municipio por la NSR-10 y bajo las consideraciones además del estudio de microzonificación sísmica para el área urbana de Medellín (1999).

3.2.8. Análisis de la distancia de viaje

La distancia de viaje o Run-Out se determinó siguiendo la metodología propuesta por Guimarães (2015), donde se tomó en cuenta la distancia de la masa del deslizamiento a partir del cálculo de parámetros geométricos, tomando las siguientes variables y su relación con la expresión:

$$Z = \frac{H}{d}$$

Dónde:

H= Es la relación o diferencia de cotas entre el punto de desprendimiento del material y la parte más baja de la vertiente, es decir, los valores de cota máxima (C_{Tmax}) y cota mínima (C_{Tmin}).

d= Es la distancia entre el punto de desprendimiento del material y un pixel con un valor de cota mínima determinado.

Z= Se asocia al isocontorno formado por las diferentes trayectorias o valores de d resultantes.

Los puntos críticos o zonas desde las cuáles se pudo generar un desprendimiento de materiales en la parte alta de las laderas analizadas, se determinaron a partir de los resultados obtenidos en los análisis de amenaza. Una vez realizado este proceso y en conjunto con las diferencias de cotas obtenidas a partir del MDE, se aplicó la ecuación para cada uno de los puntos analizados, obteniendo como resultado la generación de un isocontorno con diferentes probabilidades de trayectoria de desplazamiento.

Para el presente estudio se tomó el valor del cociente aplicado entre la variable H y la d, a partir de 0.4, ya que este concentra hasta el 90% de probabilidad de las trayectorias, por lo tanto, el isocontorno arrojado no se asocia en sí a la trayectoria

del material, sino que se entiende en términos de probabilidad.

3.2.9. Zonificación de la amenaza por movimientos en masa

Para el correcto desarrollo de la zonificación de amenaza por movimientos en masa se tuvo como principal criterio los parámetros establecidos en el decreto 1626 de 2015, basados en la información de detalle obtenida de la inspección de campo y la exploración del subsuelo para posteriormente calcular los factores de seguridad al deslizamiento de cada perfil. Estos modelos requirieron de información específica sobre estratificación, estructura, propiedades de resistencia de los materiales, ángulo de fricción interno, y modelos de simulación de niveles freáticos.

El valor límite para el factor de seguridad en el caso estático se tomó de acuerdo a lo planteado en el decreto 1626 de 2015, en el cual se define que para valores inferiores a 1.2 (o $PF > 0.05/\text{año}$) el nivel de amenaza es alto, valores entre 1.2 y 1.5 (PF entre 0.002 y 0.05/año) se clasifican con nivel de amenaza media y factores de seguridad > 1.5 ($PF < 0.002$) se definen con nivel de amenaza bajo. Para el caso pseudoestático se consideró que factores por encima de 1.1 garantizan la estabilidad de la ladera, siendo este criterio utilizado en la práctica general.

Los resultados de los análisis de estabilidad se extrapolaron a todo el polígono utilizando criterios geomorfológicos, buscando integrar áreas con las mismas características presentes en los perfiles de estabilidad, para lo cual se utilizó el criterio experto del geólogo y geotecnista. Se descartó la utilización de metodologías de superposición de mapas, puesto que en estudios anteriores los técnicos de Planeación Municipal consideraron este tipo de mapas, menos precisos.

3.3. ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD

Para la evaluación de la vulnerabilidad por movimientos en masa se partió de la metodología planteada por el SGC (2015), con la cual se caracterizaron los elementos expuestos y se evaluó la fragilidad de los mismos. Finalmente se estimó la intensidad para los escenarios de movimientos en masa lentos y rápidos, de acuerdo a las características de cada una de las zonas en estudio. Es de anotar que de acuerdo a la normatividad nacional y municipal, la vulnerabilidad evaluada fue únicamente la de tipo físico.

Para la definición de la vulnerabilidad física en los polígonos que comprendieron el área de estudio se realizó un análisis para las construcciones y para las líneas vitales.

3.3.1. Fichas de levantamiento de la información.

Esta etapa comprendió la revisión de la información secundaria, la generación de mapas que integraron la información de catastro y la red vial, además de la generación y validación de las fichas de levantamiento de la información. Estas últimas se modificaron a partir de la metodología del SGC (2015) y fueron adaptadas según las condiciones encontradas en los polígonos.

Las fichas elaboradas para el levantamiento de información y el diligenciamiento para su instructivo se encuentran en la carpeta de anexos y se enumeran a continuación:

- Ficha de levantamiento de construcciones
- Ficha de levantamiento de líneas vitales: Acueducto
- Ficha de levantamiento de líneas vitales: Energía
- Ficha de levantamiento de líneas vitales: Vías
- Ficha de levantamiento de líneas vitales: Alcantarillado

3.3.2. Trabajo de campo

El trabajo de campo incluyó dos etapas, la primera de ellas relacionada con la validación y construcción de las fichas de levantamiento de información y la segunda, que comprendió el mayor porcentaje de las actividades de campo, estuvo asociada al diligenciamiento de las fichas en cada uno de los polígonos que incluyó un registro fotográfico de cada uno de los elementos. La identificación de las construcciones se realizó por medio del código catastral CBML (Comuna – Barrio – Manzana – Lote), cuando se presentaron viviendas nuevas en los polígonos, se les asignó un nuevo código CBML según la ubicación del lote, para permitir su referenciación y levantamiento.

Para el análisis de las líneas vitales, se realizó el levantamiento de la totalidad de ellas en el caso de las redes viales; mientras que para las de acueducto y alcantarillado su levantamiento estuvo supeditado a su visualización. Finalmente, las fichas de las estructuras relacionadas con las redes de energía se diligenciaron para aquellas que presentaron daños o algún tipo de deterioro.

Es de anotar que para el levantamiento de las fichas de campo, se desarrolló un aplicativo digital, el cual garantizó la integridad de la información y la digitalización directamente en campo.

3.3.3. Análisis de la información

Una vez concluido el trabajo de campo, se realizó el procesamiento de la información, los distintos parámetros obtenidos permitieron la identificación y localización de los elementos expuestos, la evaluación de la fragilidad y la resistencia de cada una de las construcciones y las líneas vitales levantadas.

3.4. VULNERABILIDAD EN LAS CONSTRUCCIONES

Para la evaluación de la vulnerabilidad por construcción como se mencionó anteriormente, se partió de la metodología planteada por el SGC (2015), sin embargo a esta se le realizaron algunos ajustes en función de incluir algunos factores que para el contexto de la ciudad de Medellín son importantes, como la inclusión del tema de servicios públicos específicamente acueducto y alcantarillado. De igual manera, fueron ajustados los valores de fragilidad de algunos factores, pues la aplicación en otros ejercicios anteriores, mostraban que eran muy restrictivos

3.4.1. Cálculo de la fragilidad

Para el caso de los elementos a evaluar (construcciones y líneas vitales) dependió de las características de estos.

Fragilidad para movimientos en masa: siguiendo la metodología propuesta por Li et al. (2010), modificada por Du et al. (2013), se consideraron cuatro parámetros para la evaluación de la fragilidad de las edificaciones, relativos al tipo de estructura (S_{tip}), su altura (S_{alt}), su conservación (S_{con}) y su edad (S_{ed}), adicional a los anteriores, se adicionaron la fragilidad de acueducto y de alcantarillado, debido a la influencia de estos factores en la vulnerabilidad de las construcciones ubicadas en las laderas de la ciudad. Partiendo de estos parámetros, se calculó la fragilidad de la estructura (S_e) con la siguiente ecuación que al desarrollar cada uno de sus factores se expresa de la siguiente manera:

$$S_e = 1 - \pi (1 - s_i)$$

$$S_e = 1 - (1 - S_{tip}) (1 - S_{alt}) (1 - S_{con}) (1 - S_{ed})(1 - S_{Acueducto})(1 - S_{Alcantarillado})$$

En el anexo metodológico se encuentran las diferentes tablas y fórmulas requeridas para cada uno de los parámetros

3.4.2. Intensidad de los movimientos en masa lentos en edificaciones.

Los parámetros de intensidad para este escenario de análisis, según la propuesta de Du et al. (2013), son la velocidad, las deformaciones locales y la profundidad del deslizamiento, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$I_{len} = 1 - (1 - I_{l-def}) (1 - I_{l-vel}) (1 - I_{l-prof})$$

Donde

I_{len} es la intensidad para movimientos lentos. Un valor de intensidad de 1,0 indica que el evento tiene el potencial de destruir todos los elementos en su trayectoria.

I_{l-def} es el parámetro de intensidad por deformación. Entre las deformaciones se incluyen asentamientos, desplazamientos horizontales e inclinaciones. El parámetro de intensidad I_{l-def} se da para la relación de estas deformaciones con respecto a los umbrales tolerables según la tipología de la edificación.

I_{l-vel} es el parámetro de intensidad por velocidad.

I_{l-prof} es el parámetro de intensidad por profundidad de la masa deslizada. Para edificaciones localizadas sobre deslizamientos activos, el grado de daño depende principalmente de la profundidad relativa de la cimentación de la estructura con respecto a la profundidad de la superficie de falla.

En el anexo metodológico se encuentra las diferentes tablas y fórmulas requeridas para cada uno de los parámetros.

3.4.3. Intensidad de los movimientos en masa rápidos en edificaciones.

En términos generales, la intensidad de los movimientos en masa en este escenario se definió en función de su profundidad y de la presión de impacto según la siguiente ecuación la ecuación propuesta por Du et al. (2013):

$$I_{rap} = 1 - (1 - I_{f-pre}) (1 - I_{f-prof})$$

I_{rap} es la intensidad para el escenario con movimientos rápidos.

I_{f-pre} es el parámetro de intensidad debido a la presión y se estima a partir de la relación entre la presión de impacto del deslizamiento y la presión límite soportada por la estructura.

If-prof es el parámetro de intensidad por la profundidad del deslizamiento. Este parámetro se presenta en función de la relación entre la profundidad del deslizamiento y la altura de la edificación.

En el anexo metodológico se encuentran las diferentes tablas y fórmulas requeridas para cada uno de los parámetros.

3.5. VULNERABILIDAD EN LAS LÍNEAS VITALES

De manera análoga, la evaluación de la vulnerabilidad en las construcciones para las líneas vitales se calculó la fragilidad de acuerdo a la característica de cada línea y posteriormente la intensidad.

Para los diferentes fenómenos amenazantes, la fragilidad se consideró igual y la intensidad si presenta variaciones de acuerdo al fenómeno.

3.5.1. Fragilidad en líneas vitales

La fragilidad en las líneas vitales se evaluó para las redes viales, de acueducto y alcantarillado y energía, esta última evaluada a partir de los postes.

Fragilidad en vías: para evaluar la fragilidad en las vías se consideraron los parámetros de material o tipo, existencia de obras de drenaje y daños. Partiendo de estos parámetros, se calculó la fragilidad de las vías con la siguiente ecuación que al desarrollar cada uno de sus factores se expresa de la siguiente manera:

$$S_{vías} = 1 - (1 - S_{mat})(1 - S_{dr})(1 - S_{da})$$

$$S = S_i \cdot \text{Factor incidencia}$$

Dónde *S_{mat}* es el factor de fragilidad por material/tipo; *S_{dr}* es el factor de fragilidad por existencia de obras de drenaje y *S_{da}* es el factor de fragilidad por existencia de daños en el tramo de estudio.

Fragilidad en acueducto: para evaluar la fragilidad en el acueducto se consideraron los parámetros de operador de red, el estado, el diámetro, la deflexión y el material. Partiendo de estos parámetros, se calculó la fragilidad del acueducto con la siguiente ecuación que al desarrollar cada uno de sus factores se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Sacued} = 1 - (1 - \text{Soperad de red})(1 - \text{Sestado})(1 - \text{Sdiám})(1 - \text{Smat})$$

Dónde *Soperad de red* es el factor de fragilidad por operador de red; *Sestado* es el factor de fragilidad por estado, *Sdiám* es el factor de fragilidad por diámetro y *Smat* es el factor de fragilidad por material.

Fragilidad en alcantarillado: para evaluar la fragilidad en el alcantarillado se consideraron los parámetros de operador de red, el estado y el material. Partiendo de estos parámetros, se calculó la fragilidad del alcantarillado con la siguiente ecuación que al desarrollar cada uno de sus factores se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Salcant} = 1 - (1 - \text{Soperador de red})(1 - \text{Sest})(1 - \text{Smater})$$

Donde *Soperador de red* es factor de fragilidad por operador de red, *Sest* es el factor de fragilidad por estado de red y *Smater* es el factor de fragilidad por material

Fragilidad en la energía: para evaluar la fragilidad en la energía se consideraron los parámetros de carga y estado de las redes. Partiendo de estos parámetros, se calculó la fragilidad con la ecuación que se presenta a continuación, que al desarrollar cada uno de sus factores se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Senenergía} = 1 - (1 - \text{Scarga})(1 - \text{Sestado})$$

Donde *Scarga* es el factor de fragilidad por carga de red y *Sestado* es el factor de fragilidad por estado de la red.

En el anexo metodológico se encuentran las diferentes tablas y fórmulas requeridas para cada uno de los parámetros.

3.5.2. Intensidad en líneas vitales para movimientos en masa lentos

Para el cálculo de la intensidad por movimientos en masa lentos para líneas vitales, se siguió la metodología propuesta por el SGC (2015), en donde se empleó el parámetro de intensidad por deformación. Entre las deformaciones se incluyen hundimientos, desplazamientos horizontales e inclinaciones.

Intensidad en vías: para el caso de vías, de acuerdo con los niveles de daño definidos para los pavimentos flexibles y rígidos en las guías de inspección visual del Invías (2006 a y b), el umbral tolerable de deformación es 40 mm.

Intensidad en acueducto: considerando que el deslizamiento impone una carga uniforme a lo largo del tubo, los umbrales tolerables están dados por la ecuación

$$\delta = 0,0075 \frac{1}{D}$$

Con el diámetro D en metros.

Intensidad en alcantarillado: teniendo en cuenta las características de las uniones de las tuberías de gres, se definió un umbral tolerable de 5 cm.

Intensidad en energía: para este caso se utilizó la mitad de la flecha máxima permitida para el diseño de los postes, correspondiente al 3 % de la altura nominal de estos.

3.5.3. Intensidad en líneas vitales para movimientos en masa rápidos

Para este tipo de eventos según el SGC (2015), en las vías se contemplaron los parámetros de intensidad en función del ancho invadido, para redes de acueducto y alcantarillado los desplazamientos inducidos al terreno y para las redes de electricidad la presión ejercida por masa deslizada sobre los postes.

El parámetro de intensidad de la amenaza para redes viales se definió a partir del ancho de vía invadido u ocupado por la masa deslizada.

Para evaluar la intensidad en redes de acueducto y alcantarillado, con un escenario de movimiento rápido de la masa inestable, se estableció el parámetro en función de la relación de desplazamientos inducidos y el umbral tolerable, como se definió para movimientos lentos (SGC, 2015).

En el anexo metodológico se encuentran las diferentes tablas y fórmulas requeridas para calcular cada uno de los parámetros.

3.6. VULNERABILIDAD EN LAS PERSONAS

La evaluación de la vulnerabilidad en las personas, se desarrolló a partir de la metodología planteada por el SGC (2015). Sin embargo, como el inventario de elementos expuestos se realizó por construcción y no correspondió a un censo de

población, se tomó para su cálculo el número de personas promedio por vivienda del barrio.

La vulnerabilidad física de personas se evaluó en conjunto con la vulnerabilidad de edificaciones). Para este trabajo, la fragilidad de personas en estructuras se determinó en función de la fragilidad de tales estructuras, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$S_{per} = (S_e)^{3.2}$$

Donde S_{per} es la fragilidad de las personas.

La intensidad en las personas se evaluó de la misma manera que se evaluó para las construcciones.

3.7. CÁLCULO Y ZONIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad es función de la fragilidad y de la intensidad del evento amenazante, para su cálculo se evaluaron las metodologías propuestas por Guimarães (2015) y por Du et al. (2013, 2014, en SGC, 2015). Los resultados de las metodologías son muy similares, siendo un poco más conservadora la metodología de Du et al, la cual fue empleada para este estudio y la cual se resume en la siguiente ecuación.

$$V = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{I}{1-S} \right)^2 & I \leq 1 - S \\ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{1-I}{S} \right)^2 & I > 1 - S \end{cases}$$

Dónde:

V es la vulnerabilidad de los elementos expuestos a la amenaza

I es la intensidad del evento

S es la fragilidad del elemento expuesto

Los rangos dados a la vulnerabilidad fueron: para vulnerabilidad baja valores menores de 0,1, para vulnerabilidad media valores entre 0,1 y 0,5, y para vulnerabilidad alta valores superiores a 0,5.

Se definieron las categorías de vulnerabilidad para personas en edificaciones basados en Li et al. (2010), Du et al. (2013) y Coburn (2002, en Du et al., 2013). Para el cálculo y la zonificación de la vulnerabilidad en las personas, se partió de la misma ecuación y se tomó el valor de S como la fragilidad de las personas.

3.8. EVALUACIÓN DEL RIESGO

La evaluación del riesgo se realizó para cada uno de los elementos expuestos (construcciones y líneas vitales) en función de definir acciones puntuales de mitigación y para los polígonos de análisis en función de definir restricciones de uso desde la planificación.

3.8.1. Riesgo por Elementos Expuestos.

El riesgo es función de la amenaza y la vulnerabilidad, para fines cartográficos se definió la siguiente regla de decisión para determinar el nivel de riesgo para los elementos expuestos, la cual ha sido modificada del decreto 1626 de 2015 (Tabla 1).

Tabla 1. Regla de decisión para el riesgo individual. Modificado de Phoon (2008) citado por Alcaldía de Medellín (2015).

NIVEL DE AMENAZA	VULN. ALTA	VULN. MEDIA	VULN. BAJA
ALTA	ALTO	ALTO	MEDIO
MEDIA	ALTO	MEDIO	BAJO
BAJA	BAJO	BAJO	BAJO

La regla de decisión utiliza los valores de los rangos de amenaza y vulnerabilidad definida en los componentes anteriores. De igual manera, en función de determinar la probabilidad de que se generen daños y su magnitud a partir de la vulnerabilidad y el fenómeno amenazante, se realizó la estimación de la probabilidad anual para la amenaza. Para el caso de los movimientos en masa esta probabilidad anual estuvo en función de los periodos de retorno de los eventos de lluvia que tienen una incidencia sobre los movimientos en masa y de los sismos, para el cual se trabajó con el periodo de retorno de 475 años. El valor de la amenaza se multiplicó con la vulnerabilidad y de esta manera se obtuvo el indicador de riesgo por elemento expuesto.

Para el riesgo por personas se aplicó esta misma tabla de decisión y la cantidad total de personas en riesgo se evaluó a partir de un valor promedio de habitante por

vivienda en cada barrio. Es de anotar que el número de personas en riesgo es un estimado, ya que no se realizó un censo de población.

3.8.2. Riesgo por Polígono.

Para realizar la evaluación de riesgo por polígono para movimientos en masa, se revisaron varias metodologías como la de Cardinali et al., (2002) y de Fell y Hartford (1997). Finalmente, a partir de los posibles escenarios y de integrar la magnitud de la amenaza, que depende de la velocidad y la profundidad, con la probabilidad de que se presente el fenómeno, obtenida de la amenaza o del análisis de estabilidad, se elaboró la siguiente regla de decisión. Es de anotar que la condición de mitigabilidad de una zona está en función no solo de las características de la amenaza y la vulnerabilidad, sino de la relación costo beneficio (Tabla 2).

Tabla 2. Regla de decisión para el riesgo por polígono para movimientos en masa.

Factores	Magnitud de la amenaza	Amenaza según factores seguridad	Índice de vulnerabilidad (Edificaciones)	Zona de riesgo por movimientos en masa
Velocidad Alta / Profundidad Alta	Muy Alta	Alta	1.0	Extremadamente alto/No Mitigable/Soluciones Alto Costo
Velocidad Alta / Profundidad Alta	Muy Alta	Media	1.0	Riesgo Alto
Velocidad Alta / Profundidad Alta	Muy Alta	Baja	1.0	Bajo
Velocidad Media - Baja / Profundidad Alta	Alta	Alta	0,6	Riesgo Alto
Velocidad Media - Baja / Profundidad Alta	Alta	Media	0,6	Medio
Velocidad Media - Baja / Profundidad Alta	Alta	Baja	0,6	Bajo
Velocidad Media -Alta/Profundidad Media	Alta	Alta	0.7	Riesgo Alto
Velocidad Media -Alta/Profundidad Media	Alta	Media	0.7	Riesgo Alto
Velocidad Media -Alta/Profundidad Media	Alta	Baja	0.7	Bajo
Velocidad Baja/Profundidad Media	Media	Alta	0,5	Riesgo Alto
Velocidad Baja/Profundidad Media	Media	Media	0,5	Medio
Velocidad Baja/Profundidad Media	Media	Baja	0,5	Bajo
Velocidad Alta/Profundidad Baja	Media	Alta	0.4	Medio
Velocidad Alta/Profundidad Baja	Media	Media	0.4	Medio
Velocidad Alta/Profundidad Baja	Media	Baja	0.4	Bajo
Velocidad Media - Baja / Profundidad Baja	Baja	Alta	0.1	Medio
Velocidad Media - Baja / Profundidad Baja	Baja	Media	0.1	Bajo
Velocidad Media - Baja / Profundidad Baja	Baja	Baja	0.1	Bajo

Los parámetros de magnitud y probabilidad de la amenaza, se combinaron en la regla de decisión generando un criterio para determinar la zona de riesgo. Ahora bien, el nivel de mitigabilidad está en función de la relación de los elementos expuestos, específicamente de su cantidad y calidad, con los costos de las obras de mitigación, por lo tanto la definición de mitigabilidad se hizo de manera particular para cada polígono estudiado y no obedece a una regla de decisión fija.

4. REVISIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

Para la elaboración de este documento, se tuvo en cuenta la información secundaria recopilada en varias instituciones, tales como el Departamento Administrativo de Planeación, Empresa de Desarrollo Urbano – EDU, Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres, Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Corantioquia. La información utilizada se sintetiza a continuación, donde se indica cuáles son los datos más relevantes y de utilidad para el proyecto.

Título	Mapa geomorfológico, de amenazas y áreas degradadas en la jurisdicción de Corantioquia
Autor (es)	Corantioquia
Año	2002
Localización de referencia: Jurisdicción de Corantioquia	
Resumen: Este mapa representa la geomorfología de los municipios que conforman la jurisdicción de Corantioquia, organizada de forma jerárquica a escala 1:100.000, donde se tienen en cuenta el origen de las unidades. Además se presenta el mapa de amenazas y áreas degradadas, donde se señalan las áreas prioritarias para la intervención de la corporación.	
Observaciones: La jerarquización establecida en el mapa geomorfológico de Corantioquia permite amarrar los a niveles regionales los mapas geomorfológicos de cada polígono.	

Título	Estudio hidrometeorológico y geomorfológico de 10 quebradas del Valle de Aburrá
Autor (es)	Juan José Montoya y Jorge Eduardo Patiño, para optar al título de maestría en Ciencias de la Tierra de la Universidad EAFIT
Año	2001
Localización de referencia: Cuencas de las quebradas Ana Díaz	
Resumen: Se realizaron los estudios hidrometeorológicos, geomorfológicos y edafológicos de las cuencas estudiadas para elaborar los mapas de amenaza por inundación y avenidas torrenciales. Adicionalmente, se implementó una base de datos georeferenciada con la información secundaria y primaria en los estudios hidrometeorológicos con el fin de simular el comportamiento de las cuencas con modelos de precipitación – escorrentía. Como anexo para cada una de las cuencas y sus principales afluentes se presentan los parámetros morfométricos, el mapa de usos del suelo, formaciones superficiales y los análisis hidrológicos e hidráulicos.	
Observaciones: Levantamiento de depósitos aluvio – torrenciales identificados en los cauces de las quebradas y los mapas de amenaza por inundación para un periodo de retorno de 100 años superpuesta con información de viviendas e infraestructura.	

Título	Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado
Autor (es)	Área Metropolitana del Valle de Aburrá
Año	2007
Localización de referencia: Municipios del Valle de Aburrá	
Resumen: Un estudio detallado de la geología, geomorfología, neotectónica, geotécnica y de la amenaza sísmica para los municipios del Valle de Aburrá, permitieron obtener la Microzonificación Sísmica detallada de estos municipios. Se define para el municipio de Medellín que la aceleración máxima en el basamento rocoso con un periodo de retorno promedio de 475 años es de 0,22 g y se pueden presentar desplazamientos máximos del terreno de 22 cm.	
Observaciones: Información básica de geología y geomorfología escala 1:10.000, de la cual se parte para detallar a escala 1:2.000 en los polígonos objeto de estudio.	

Título	Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el valle de Aburrá. Formulación de propuestas de gestión
Autor (es)	Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín
Año	2009
Localización de referencia: Valle de Aburrá	
Resumen: objeto es la realización de una Zonificación de la Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales; en este capítulo se presenta el informe técnico correspondiente al proceso de elaboración de la Zonificación de la Amenaza por movimientos en masa, teniendo en cuenta como detonante principal la lluvia. La metodología empleada está basada en una herramienta computacional conocida como redes neuronales artificiales (RNA), la cual está siendo cada vez más empleada en la solución de problemas que involucran gran cantidad de variables con bases de datos.	
Observaciones: Teniendo en cuenta lo anterior se pretende obtener como resultado un mapa que evalúe de manera probabilística la amenaza por movimiento en masa para el Valle de Aburrá, y refinar el modelo para el municipio de Medellín con el fin de obtener un mapa más detallado. Basta aclarar que para lograr dicho objetivo en el municipio de Medellín, se refinaron la base de datos, se agregaron las variables permeabilidad y curvatura, y se hizo uso de la metodología descrita anteriormente, con lo cual se obtuvo un mapa probabilístico de amenaza por movimiento en masa con un detalle de 1:5000.	

Título	Proyecto urbano para la legalización y regularización urbanística Barrios El Corazón, Las Independencias, Nuevos Conquistadores y El Salado. Comuna 13
Autor (es)	Municipio de Medellín - Departamento Administrativo de Planeación Universidad de Antioquia – Facultad de Derecho y Ciencias Políticas
Año	2009
Localización de referencia: Barrios el corazón, las independencias, nuevos conquistadores y El Salado. Comuna 13, municipio de Medellín	
Resumen: En el Plan de Desarrollo para Medellín se incluyen cinco componentes, entre ellos el de Vivienda y Hábitat, como programas de este componente, se encuentra el de Mejoramiento Integral de Barrios, que comprende proyectos de Legalización y Mejoramiento de vivienda, titulación de predios, mejoramiento de entornos barriales y la Regularización Urbanística, como alternativa de solución a los problemas y conflictos detectados en estos sectores mediante acciones que consideren esta dinámica, integren la ciudad urbana y la ciudad rural buscando el mutuo beneficio. En esa dirección, el Proyecto de Regularización y Legalización Urbanística para los barrios Las Independencias, Nuevos Conquistadores, El Corazón, El Salado y Veinte de Julio localizados en la Comuna 13 de Medellín, constituyendo una materialización concreta de las políticas a nivel municipal, nacional e internacional.	
Observaciones: Información básica de geología y formaciones superficiales, variables morfométricas, geomorfología, procesos geomorfológicos, aptitud geológica del suelo y caracterización de las zonas de riesgo de los polígonos objeto de este estudio. Este estudio presenta una caracterización general de las microcuencas entre las que se identifica la quebrada Ana Díaz	

Título	Descripción de zonas homogéneas - Microzonificación sísmica del área urbana de Medellín
Autor (es)	Alcaldía de Medellín
Año	2011
Localización de referencia: Municipio de Medellín	

Resumen: Después de entrar en vigencia la norma NSR-2010 y el estudio de Microzonificación sísmica del 2007, se definieron 14 zonas homogéneas para el municipio de Medellín de acuerdo con el comportamiento particular de los diferentes tipos de suelos frente a los sismos. También se presenta el mapa con la distribución espacial de estas zonas y los coeficientes espectrales para los sismos de control de daños y de diseño para cada una de éstas, valores que corresponden a la aceleración máxima esperada en la superficie del terreno.

Observaciones: De esta información se obtiene el valor de aceleración máxima en el terreno para el sismo para los análisis geotécnicos de estabilidad de las laderas.

Título	Revisión y ajuste del Plan de Ordenamiento Territorial de Medellín. Acuerdo 48 de 2014
Autor (es)	Alcaldía de Medellín
Año	2014
Localización de referencia: Municipio de Medellín, Vertiente noroccidental.	
Resumen: Plan de Ordenamiento Territorial se consigna el conjunto de objetivos, directrices, políticas, estrategias, metas, programas, actuaciones y normas para orientar y administrar el desarrollo físico del territorio y la utilización del suelo urbano y rural del municipio de Medellín.	
Observaciones: El Acuerdo 48 de 2014, define las zonas con condiciones de riesgo y las zonas de amenaza alta, que son objeto para la elaboración de los estudios de riesgo o de amenaza de detalle que definan su mitigabilidad o no. Dichos estudios, determinarán la posibilidad de desarrollo del suelo o su permanencia dentro de la categoría de suelo de protección. Una vez sean redelimitadas dichas zonas, les aplicarán las demás normas generales del polígono en el que se ubiquen.	

Título	Mapa de procesos morfodinámicos del área urbana del municipio de Medellín
Autor (es)	Alcaldía de Medellín
Año	2017
Localización de referencia: Medellín	
Resumen: La información relacionada con visitas a diferentes sectores de la ciudad, donde han ocurrido emergencias por diferentes fenómenos (movimientos en masa, inundaciones, incendios, etc) son consignadas en fichas y mapas que permiten tener construir un registro histórico de los eventos en la ciudad.	
Observaciones: Los datos de obtenidos de esta información permite reportar los eventos ocurridos en cada polígono para entender el contexto de la morfodinámica del sector.	

5. CARACTERISTICAS GENERALES

A continuación serán descritas la geología y geomorfología regional buscando contextualizar estas variables en el área de estudio.

5.1. GEOLOGÍA REGIONAL

El área de estudio se encuentra localizada sobre la vertiente occidental del Valle de Aburrá, en donde se presenta un basamento rocoso de edad Jurásica y cretácica, representadas por las Metabasitas del Picacho (JKmbP), las cuales hacen parte del Complejo Ofiolítico de Aburrá, las cuales han sufrido dos eventos metamórficos, uno dinámico y otro térmico y en segundo lugar se encuentra el Stock de Altavista (Kda), caracterizado por un cuerpo plutónico diorítico, con amplia variedad en composición y textura. Finalmente y asociado a los procesos naturales que han afectado dicha vertiente se identifican una serie de materiales recientes de edad Cuaternaria, correspondientes a depósitos de vertiente asociados a antiguos movimientos en masa que se han desprendido de la parte alta de la ladera y que se han acumulado en zonas de menor pendiente, representando una compleja secuencia de depósitos con edades desde el Terciario Tardío hasta el Cuaternario, además de depósitos aluviales y aluvio – torrenciales asociados a la dinámica depositacional de algunos cuerpos de agua como las quebradas El Salado y Ana Díaz y algunos de sus principales afluentes (Figura 2).

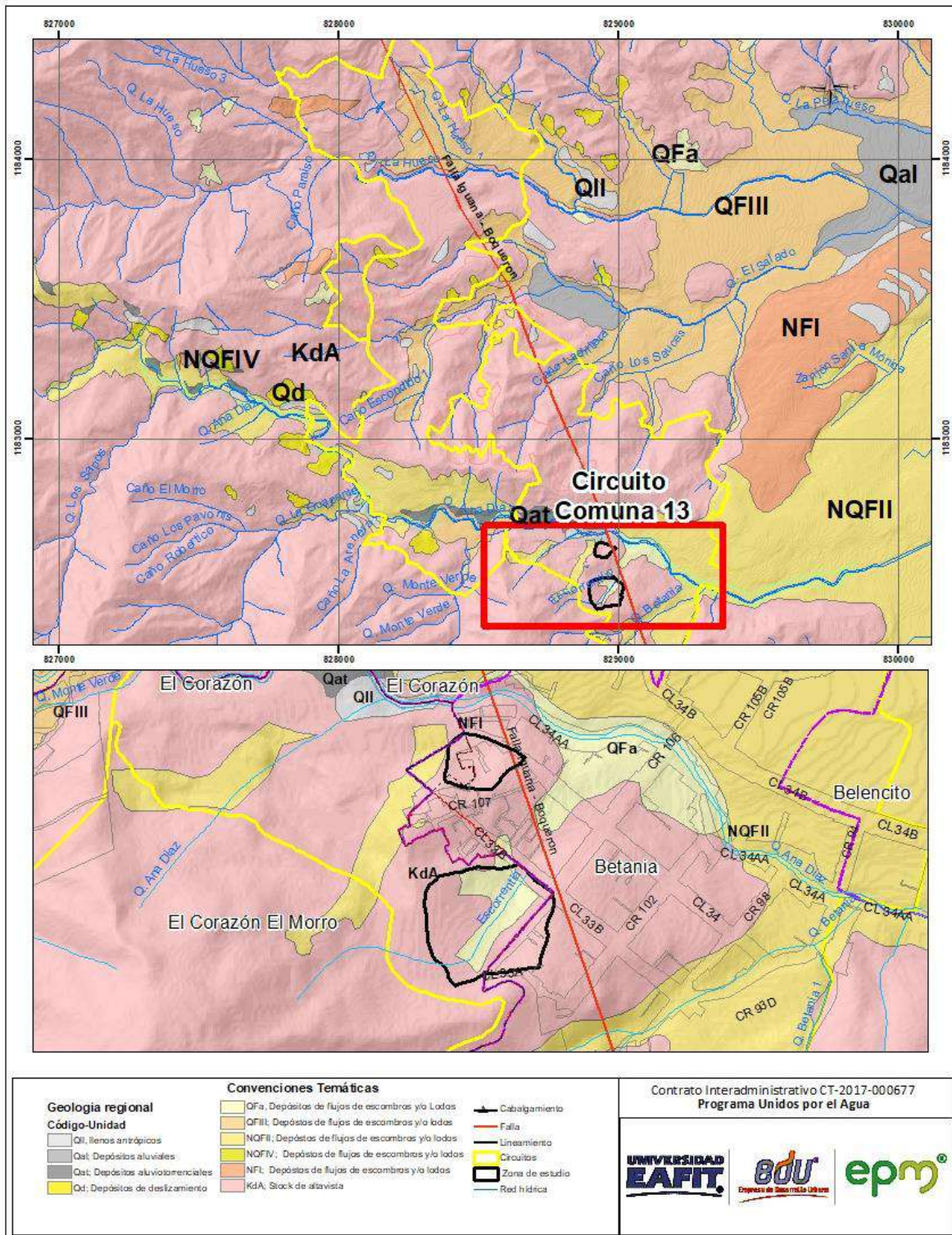


Figura 2. Mapa geológico regional circuito Corazón (Tomado de AMVA (2007) y AMVA – Alcaldía de Medellín (2017)).

5.1.1 Estratigrafía

A nivel regional se identificaron cinco unidades geológicas que se describen a continuación.

- **Metabasitas de El Picacho (JKmbP)**

Corresponde al antes denominado Metagabro de El Picacho por Correa *et al.* (2005) y que junto con la Dunita de Medellín hacen parte del Complejo Ofiolítico de Aburrá, sin embargo, Restrepo (2008) renombra la unidad como Metabasitas de El Picacho y está conformada por las rocas del Metagabro de El Picacho, donde se identifica la textura gabróica reliquia y por las Anfibolitas de La Espadera – Chupadero, que son anfibolitas esquistasas; adicionalmente incluye otros cuerpos menores de metagabropegmatitas, y esquistos y granofelses clorítico – actinolíticos.

El Metagabro de El Picacho tiene un protolito ígneo y se caracteriza por un bandeamiento composicional definido por capas centimétricas a decimétricas, unas ricas en minerales ferromagnesianos y otras ricas en minerales félsicos; también se puede presentar un bandeamiento estructural, con alternancia de bandas de grano grueso a muy grueso con bandas de grano fino. Los minerales principales son clinopiroxeno y plagioclasa; los minerales secundarios son anfíboles, plagioclasa y en menor cantidad cuarzo, epidota y ópacos (Correa et al., 2005).

Los afloramientos son escasos y se presentan en ventanas erosivas donde se observa la roca, por lo general está meteorizada y en pocos casos se encuentra en estado fresco. El suelo residual del metagabro y la anfibolita, no conservan la estructura de la roca original y alcanza espesores de 25 m. Estos suelos se caracterizan por el color gris claro, ligeramente moteado de blanco, también se puede presentar amarillo y amarillo rojizo, con predominio de una granulometría limo arcillosa. También se encuentra como cantos y bloques en depósitos de vertiente y algunos depósitos aluviotorrenciales (AMVA, 2007).

- **Stock de Altavista (Kda)**

Este plutón es también conocido como la Diorita de Altavista, y constituye un stock de 83 km², con forma alargada y paralela a la tendencia de las estructuras geológicas del área donde aflora (González y Londoño, 2002).

Se caracteriza por presentar una amplia variedad petrográfica, textural y estructural, por lo que se han definido tres facies: una facies diorítica, una facies félsica y una facies de dique. De acuerdo con esto, se encuentran diferentes tipos de roca como dioritas, cuarzdioritas, granitos y eventualmente pórfidos con matriz afanítica (González y Londoño, 2002).

Adicionalmente, González y Londoño (2002) indican que las rocas granulares presentan colores muy oscuros, casi negro hasta gris medio a claro, y las rocas porfíricas son de color gris verdoso; la textura varía de fanerítica granular fina a porfírica y a medida que se acerca a las zonas de contacto presenta zonas de brecha.

Las rocas están intensamente meteorizadas y desarrollan suelos con espesores hasta de 45 m, en los cuales la textura y la granulometría dependen de la facie de la roca parental. Los suelos más desarrollados están en los topes de las cuchillas y en las vertientes suaves, donde hay una capa superficial de suelo maduro de textura limo arcillosa y color claro, seguido por un saprolito limoarenoso que conserva rasgos de la roca parental. En las partes bajas se conserva la transición suelo – roca de poco espesor (AMVA, 2007).

- **Depósitos no litificados:**

Un conjunto de depósitos no litificados que están suprayaciendo las rocas antes descritas se presentan en el área de interés. Se encuentran depósitos de diferentes edades, que de acuerdo con las características que exhiben en cuanto a grado de consolidación, madurez y grado de incisión son considerados de edades anteriores al Cuaternario y por medio de las relaciones entre ellos son agrupados por eventos. En este grupo se encuentran:

Flujos de escombros y/o lodos (NQprel, NQFI, NQFII, QFIII, QFIV, QFa): Estos representan una serie de eventos relacionados con depósitos de vertiente, donde los depósitos más antiguos se localizan en la parte media y alta de las laderas y los más jóvenes están en la parte baja de éstas. Estos depósitos se caracterizan por la variación en la relación matriz/bloques, la cual confiere el carácter de flujo de lodos o flujo de escombros a los eventos, y aunque esta proporción está muy relacionada con la fuente de donde se originaron los depósitos, también es frecuente encontrar una mezcla de ambos depósitos para un único evento. En términos generales se componen por un conjunto de bloques de roca que presentan diferentes grados de meteorización y están embebidos en una matriz más fina, por lo general arcilla o limo, que también puede estar meteorizada (AMVA, 2007).

Depósitos aluviales (Qal): Se presentan conformando las llanuras de inundación y terrazas aluviales de las corrientes. Son superficies suaves, generalmente planas, conformadas por clastos que tienen una selección moderada, alto grado de redondez y ligera imbricación (AMVA, 2007).

Depósitos aluviotorrenciales (Qat): Se caracterizan por su composición heterogénea, donde el tamaño de sus componentes varía desde bloques rocosos hasta arenas finas y limos. Estos depósitos están asociados a cuencas de montaña, donde los canales tienen altas pendientes y se desarrollan flujos turbulentos con alta energía, que moviliza materiales de diferente granulometría hasta encontrar zonas de pendientes suaves aledañas al cauce, donde se depositan los materiales (AMVA, 2007).

Depósitos de deslizamiento (Qd): Se caracterizan por bloques de roca en matriz limo arcillosa. Los bloques pueden alcanzar unos tres metros de diámetro y varían desde angulosos a subredondeados (AMVA, 2007).

- **Llenos antrópicos (QII)**

Constituyen depósitos artificiales, con una composición muy heterogénea, incluyendo aquellos materiales homogéneos conformados con algunas normas técnicas, y materiales mixtos tales como basura, materia orgánica y escombros vertidos sin disposiciones geotécnicas adecuadas. También se consideran llenos antrópicos las acumulaciones artificiales realizadas para la construcción de obras de infraestructura (AMVA, 2007).

5.2. GEOMORFOLOGIA REGIONAL

El área de estudio se ubica en la zona más septentrional de la cordillera Central, asociada directamente al valle del río Medellín - Porce. La caracterización geomorfológica retoma la interpretación desarrollado por el Área Metropolitana en el estudio de Microzonificación sísmica del Valle de Aburrá, donde jerarquiza el valle en unidades de Paisaje, Macrounidades y unidades geomorfológicas.

De acuerdo con la Microzonificación sísmica del Valle de Aburrá, el área de estudio se localiza dentro de las unidades de paisaje denominadas Valle Medio. En esta unidad se reconocieron macrounidades geomorfológicas denominadas en este informe como Bloques, los cuales muestran condiciones morfológicas aproximadamente homogéneas y que se distinguen, en forma clara, de los

adyacentes. De acuerdo a esta metodología, la zona de estudio se encuentra enmarcada en la siguiente clasificación geomorfológica.

Tabla 3. Clasificación geomorfológica regional

UNIDAD DE RELIEVE	UNIDAD DE PAISAJE	MACROUNIDAD	UNIDAD GEOMORFOLÓGICA
Norte de la cordillera central	Valle de Aburrá -Valle Medio (VM)	Bloque Itagüí San Cristóbal (VM-BISC)	Colinas en suelos residuales
			Superficies suaves en depósitos poco incisados
			Superficies suaves en depósitos moderadamente incisados
			Escarpes semicirculares superiores
			Lomos
		Bloque Fondo de valle (VM_BFV)	Llanura aluvial

En las Figura 3 y Figura 4 se presentan las macrounidades y unidades geomorfológicas que se definen para los polígonos de interés.

5.2.1. Valle de Aburrá Medio (VM)

Este bloque corresponde casi a la totalidad del municipio de Medellín. Se caracteriza por ser ancho, con un fondo amplio y plano, delimitado por superficies suaves en distintos depósitos de vertiente, sistemas de colinas y lomos que terminan en la parte más alta en escarpes lineales que marcan el límite del valle y los altiplanos (AMVA, 2006)

En el Valle Medio se identificaron 12 bloques atendiendo a consideraciones de forma, ancho, orientación y contexto geomorfológico y rasgos tectónicos. La zona de estudio tiene influencia directa sobre dos de estas macrounidades.

Cada uno de los bloques es descrito a partir de sus características geomorfológicas y geológicas desarrolladas en el estudio de Microzonificación Sísmica del Valle de Aburrá.

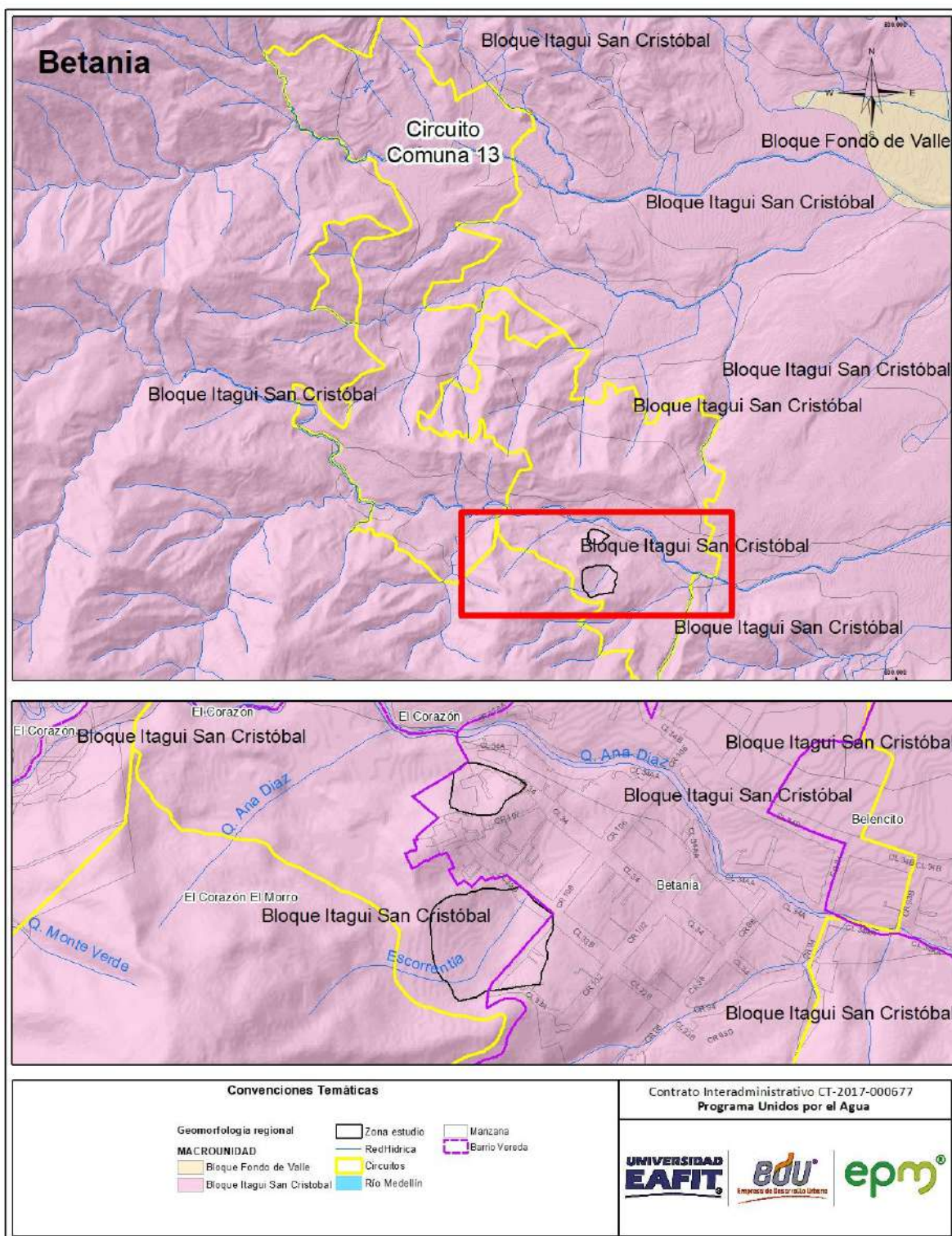


Figura 3. Mapa regional de macrounidades de del circuito Corazón (Tomado de AMVA, 2007)

- **Bloque Itagüí – San Cristóbal (VM-BISC).**

Esta área se ubica sobre la vertiente occidente de la ciudad de Medellín, involucrando el área de la cuenca de las quebradas El Salado y Ana Díaz, en la zona de estudio. Geológicamente está caracterizada sobre las rocas del Stock de Altavista, Metabasitas y los depósitos de vertiente.

La presencia de lomos regionales de tendencia W-E es la característica fundamental de esta macrounidad. Dichos lomos forman valles en “V” de fondo estrecho con vertientes largas, rectas a cóncavas y de inclinación moderada a localmente empinadas. Hacia las cabeceras las laderas rematan en escarpes semicirculares, evidencia del proceso remontante del frente erosivo del río Aburrá. El tope de los lomos es en general estrecho y redondeado, con pendientes longitudinales suaves moderadas. Se presentan en general relieves relativos menores y se conforman sistema de colinas medias a altas con base circular y laderas empinadas (AMVA, 2006).

En el área de influencia del presente estudio, se identifican las siguientes unidades geomorfológicas al interior de esta macrounidad.

CSR - Colinas en suelo residual: Esta unidad se localiza generalmente cerca de los lomos o en la terminación de los mismos. Presentan formas redondeadas con topes planos a ligeramente convexos. Las pendientes son moderadas y tienen un moderado grado de incisión (AMVA, 2007). En la zona está asociada a suelos residuales del Stock de Altavista.

SSDMI - Superficies Suaves en Depósitos Moderadamente Incisados: Son geoformas continuas de inclinación suave a moderada y modeladas sobre depósitos de vertiente del tipo flujos de lodos y/o escombros. Presentan un grado de incisión moderado (AMVA, 2007). Regionalmente esta unidad se localiza sobre ambas márgenes de las quebradas La Hueso, Ana Díaz y afluentes.

SSDPI - Superficies Suaves en Depósitos Poco Incisados: Caracterizada por laderas continuas de inclinación suave a moderada y modeladas sobre depósitos de vertiente del tipo flujos de lodos y/o escombros. Presentan un grado de incisión baja a muy baja (AMVA, 2007). En la zona de estudio, se ubican sobre ambas márgenes de la quebrada Ana Díaz.

ESCS – Escarpes semicirculares superiores: Son geoformas ubicadas entre zonas escarpadas en superficies rocosas hacia los límites de los altiplanos,

presentan además fuertes pendientes (AMVA, 2007). Regionalmente se ubica al oriente de la zona de estudio.

L – Lomos: Son filos alargados y estrechos con orientación hacia el eje fluvial principal. Son las unidades dominantes y de mayor cobertura dentro del área de estudio (AMVA, 2007). Esta unidad está asociada al Stock de Altavista en la zona de estudio

- **Bloque fondo del valle**

Corresponde como su nombre lo dice, al fondo del valle del río, caracterizada por ser una zona conformada casi en su totalidad por depósitos aluviales y aluviotorrenciales, con esporádicas ventanas erosivas de rocas metamórficas entre los que se identifican los cerros el Volador y Nutibara. Es una zona de pendientes rectas a levemente cóncavas en su cercanía a las vertientes occidental y oriental del valle. Estas zonas están relacionadas a los eventos de depositación del río Medellín y su red de drenaje asociada.

En esta Macrounidad se identificó una unidad geomorfológica.

LLA - Llanura Aluvial: Esta unidad en la zona de estudio, involucra el cauce y las riberas de la quebrada Ana Díaz y algunas de sus quebradas o tributarios principales. Es una forma continua, de pendientes suaves y topografía plana; contiene materiales producto de la sedimentación aportada por estas corrientes (AMVA, 2007).



5.3. TECTÓNICA REGIONAL

Debido a la localización en el flanco Oeste de la Cordillera Central, la tectónica del Valle de Aburra está dominada por las fallas del Sistema Cauca-Romeral; el cual atraviesa el territorio nacional con una dirección aproximada N-S. Este sistema está compuesto por dos grupos de estructuras, hacia el oeste se tiene el sistema Cauca y al Este el sistema Romeral. Este último sistema es el más cercano a la ciudad de Medellín.

La Falla de San Jerónimo representa la traza más oriental del Sistema de Fallas de Romeral y su zona de incidencia transcurre por jurisdicción de algunos municipios del Área Metropolitana de Medellín. Dinámica y estructuralmente se reconocen al menos tres eventos de deformacionales asociados a su actividad, en regímenes dúctil, frágil cohesivo, y frágil no cohesivo. El régimen tectónico analizado, revela acortamiento E-W y desplazamientos inversos para gran parte de las deformaciones registradas (Ordoñez, et al, 2005).

La traza principal de la zona de falla tiene un rumbo N-S a N15W, con un buzamiento de alto ángulo al E.

5.3.1. Sistema de Fallas

A continuación se describen las características regionales, de las fallas reportadas a lo largo del corredor evaluado:

- *Falla de Iguaná – Boquerón*

En la zona de interés esta falla se identifica con dirección N80°W – N20°W (AMVA, 2007). Sobre la zona de estudio no se observan controles geomorfológicos e hídricos asociados al trazo de esta falla. Adicionalmente, se encuentran lineamientos con tendencia SW-NE y NW – SE.

6. CONDICIONES GEOLÓGICAS LOCALES DEL POLÍGONO BETANIA

A continuación se define la unidad morfodinámica independiente para el polígono en estudio, se describen los resultados del proceso de fotointerpretación y se presentan las condiciones geológicas y geomorfológicas encontradas a partir de los recorridos de campo y la exploración geotécnica.

6.1 DEFINICIÓN DE LA UMI

Teniendo en cuenta que la unidad morfodinámica se define como aquella porción de terreno cuya estabilidad no depende del comportamiento de las zonas vecinas y complementariamente el caso inverso, es decir que presenta un comportamiento independiente de las unidades adyacentes. La delimitación de estas unidades morfodinámicas se fundamenta en la combinación de aspectos geomorfológicos e hidráulicos (Acuerdo Metropolitano 09 de 2012) como son las divisorias de aguas, drenajes o expresiones geomorfológicas. La unidad o unidades morfodinámicas puede por lo general ocupar áreas de terreno mayor que el polígono de estudio, por lo cual será necesario evaluar las condiciones geológicas, geomorfológicas y geotécnicas de toda la unidad para determinar las afectaciones por fuera del polígono estudiado cuya influencia repercuta negativamente en la estabilidad del mismo (Acuerdo Metropolitano 09 de 2012).

Teniendo en cuenta las características anteriormente referenciadas, para el área de estudio se delimitaron dos UMIs de la siguiente forma (Figura 5):

UMI 1

Al Norte está delimitada por la divisoria de aguas de un pequeño filo con dirección NW-SE hasta la calle 33B y continuando por esta hasta el cruce con la carrera 106.

Al occidente está definido la divisoria de aguas de un lomo muy bajo a la altura de la carrera 106, entre las calles 33A y 33B.

Al sur está definida por la calle 33^a y su prolongación hacia un cambio de pendiente sobre la ladera.

Al oriente está delimitado por un tope de un pequeño lomo, con dirección aproximada N-S.

UMI 2

Esta se está delimitada se la siguiente manera:

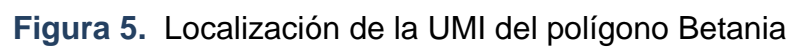
Al Norte está delimitada la calle 34, que hace la vez de escalón o cambio de pendiente de la vertiente.

Al occidente está definido la divisoria de aguas de un lomo muy bajo a la altura de la entrada a la cantera La Esmeralda.

Al sur está delimitado por un cambio en la pendiente, donde las características morfológicas sugieren un cambio abrupto de una zona de baja pendiente a una de mayor inclinación.

Al oriente está definida por un cambio de pendiente al igual que en la zona sur, siendo un límite totalmente urbanizando en inmediaciones de la carrera 107.

Los dos polígonos de las UMIs tienen un área aproximada de 1.37 hectáreas (Figura 5), los límites definidos son estables y los procesos que puedan encontrarse por fuera de estos no tendrán incidencias directas o relevantes sobre las condiciones de amenaza por movimientos en masa del polígono Betania.



6.2 FOTOINTERPRETACIÓN

Se realiza la interpretación de sensores remotos a partir de un análisis multitemporal con fotografías aéreas y ortofotos que varían entre los años de 1943 y el 2012. Este análisis tiene como objetivo identificar las condiciones morfológicas, los procesos morfodinámicos y su evolución en el tiempo, al igual que las intervenciones de tipo antrópico. A continuación, se presenta el listado de fotografías aéreas empleadas, al igual que los mapas resultantes de este proceso para el área de estudio para cada uno de los años estudiados.

Tabla 4. Fotografías aéreas empleadas para el proceso de fotointerpretación

Zona	Vuelo	Faja	Fotos	Año
Betania	C393	22	776 - 777	1943
	C1261		164-165	1969
		F1B	03-04	1989
	GEOVIAL 65	L17	101-102	1994
	Ortofoto cinturón verde			2010

El polígono analizado es compuesto por dos sectores, uno en inmediaciones de la cancha polideportiva y el otro en cercanías de la quebrada Ana Díaz, en el Barrio Betania, ambas zonas están caracterizadas por vertientes de mediana a fuerte inclinación desarrolladas sobre suelo del Stock de Altavista y llenos de origen antrópico.

La zona presenta un comportamiento muy homogéneo en las cinco fechas revisadas, caracterizada por un área de baja densidad de infraestructura y pocos procesos morfodinámicos. Esta zona está conformada por dos polígonos, el ubicado al norte (1312-1) corresponde a una vertiente de fuertes pendientes mientras que el ubicado al sur (7003-1) se caracteriza por ser una zona de morfología cóncava asociada a una antigua vaguada, en la actualidad muy intervenida.

En el año 1943 la zona se encuentra libre de construcciones, no se han desarrollado apertura de vías, ni construcción de viviendas; se caracteriza por ser una zona verde sin evidencia visible de movimientos en masa y una cobertura vegetal predominantemente de pastos.

Geomorfológicamente se observa para el polígono sur (7003-1) una ladera cóncava asociada a una vaguada de acumulación de aguas lluvias, caracterizada por pendientes muy inclinadas, poco incisadas y con cobertura predominante de pastos;

esta zona es de características muy homogéneas morfológicamente; para este año no se observa la ocurrencia de procesos morfodinámicos. El polígono norte (1312-1) se caracteriza por ser la vertiente frontal del lomo en dirección de la quebrada Ana Díaz, no se observa en la fotografía incisiones relacionadas a drenajes naturales, se caracteriza por fuertes pendientes y cobertura predominante de pastos, al igual que en el polígono anterior, no se observan procesos morfodinámicos a esta fecha. (Figura 6).

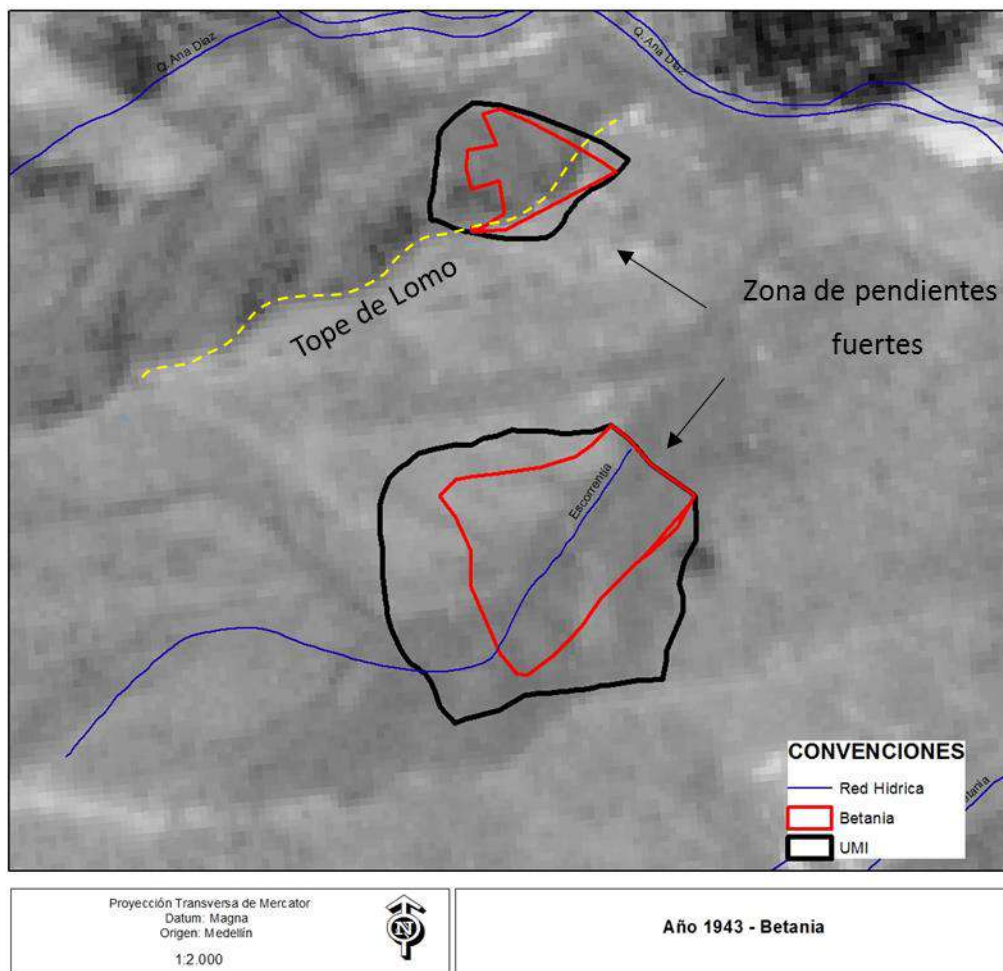


Figura 6. Fotografía aérea de 1943, polígono Betania

Para el año 1969 ya se comienza a observar un proceso de ocupación inicial de la zona, se identifica un área medianamente consolidada hacia la carrera 106 y calle 33B, ubicadas en las zonas periféricas del polígono, hacia el interior del mismo se conservan características muy similares a las de la aerofotografía del año 1943. Las intervenciones inician igualmente hacia el polígono norte (1312-2) donde se observa un camino sobre la prolongación de la calle 34, que posteriormente correspondería a la vía de ingreso a cantera La Esmeralda. Al interior del polígono norte se observa una zona sin cobertura vegetal, que puede estar asociado a intervenciones para la construcción. Geomorfológicamente, ambas áreas del polígono Betania, no presentan cambios morfológicos significativos, conservan las características de pendiente fuerte, forma cóncavas y cobertura de pastos del análisis anterior (Figura 7).

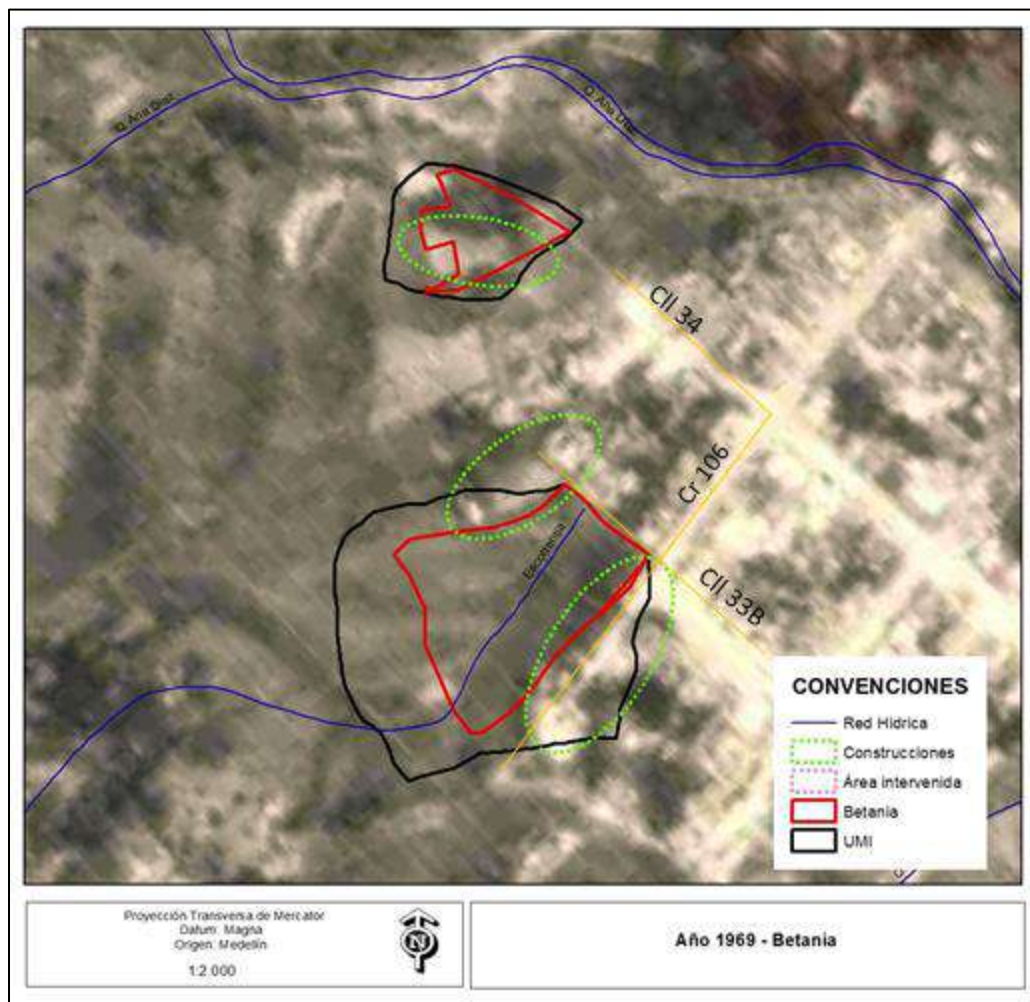


Figura 7. Fotografía aérea de 1969, polígono Betania

Para los años 1989 y 1994 la zona presenta condiciones de consolidación de los barrios aledaños al polígono, sobre la carrera 106, se observa un mayor número de edificaciones y sobre la calle 34, en la base de la vertiente. Es de anotar la apertura de grandes canteras en las inmediaciones del polígono y se observan dos vías de acceso desde estas explotaciones, hacia el polígono sur (7003-1), zona que se convertiría en un depósito de material proveniente de esta explotación (Figura 8 y Figura 9).

Geomorfológicamente se presentan cambios en la base de la vertiente del polígono norte (1312-1) relacionada con la construcción de viviendas, mientras que el polígono sur (7003-1) presenta cambios hacia el área central por donde discurre la corriente de aguas de escorrentía, posiblemente asociadas al inicio de depositación de material proveniente de la cantera.

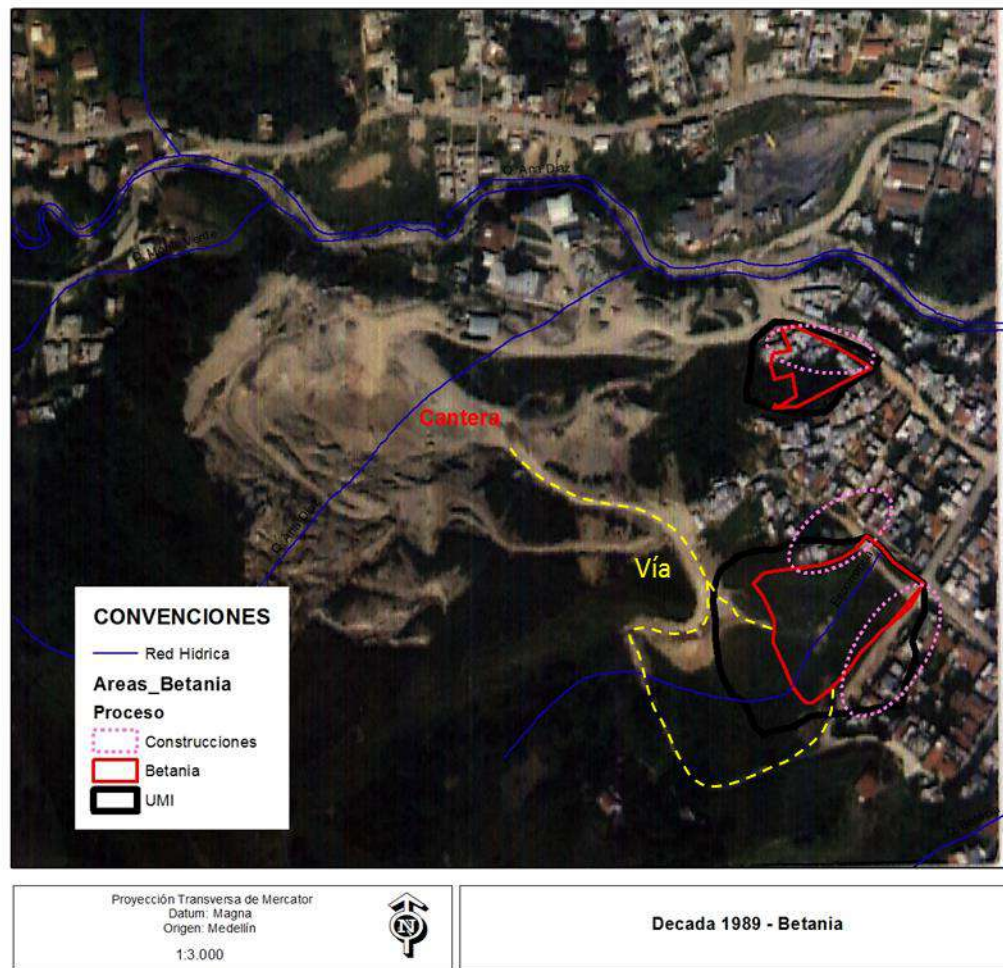


Figura 8. Fotografía aérea de 1989, polígono Betania

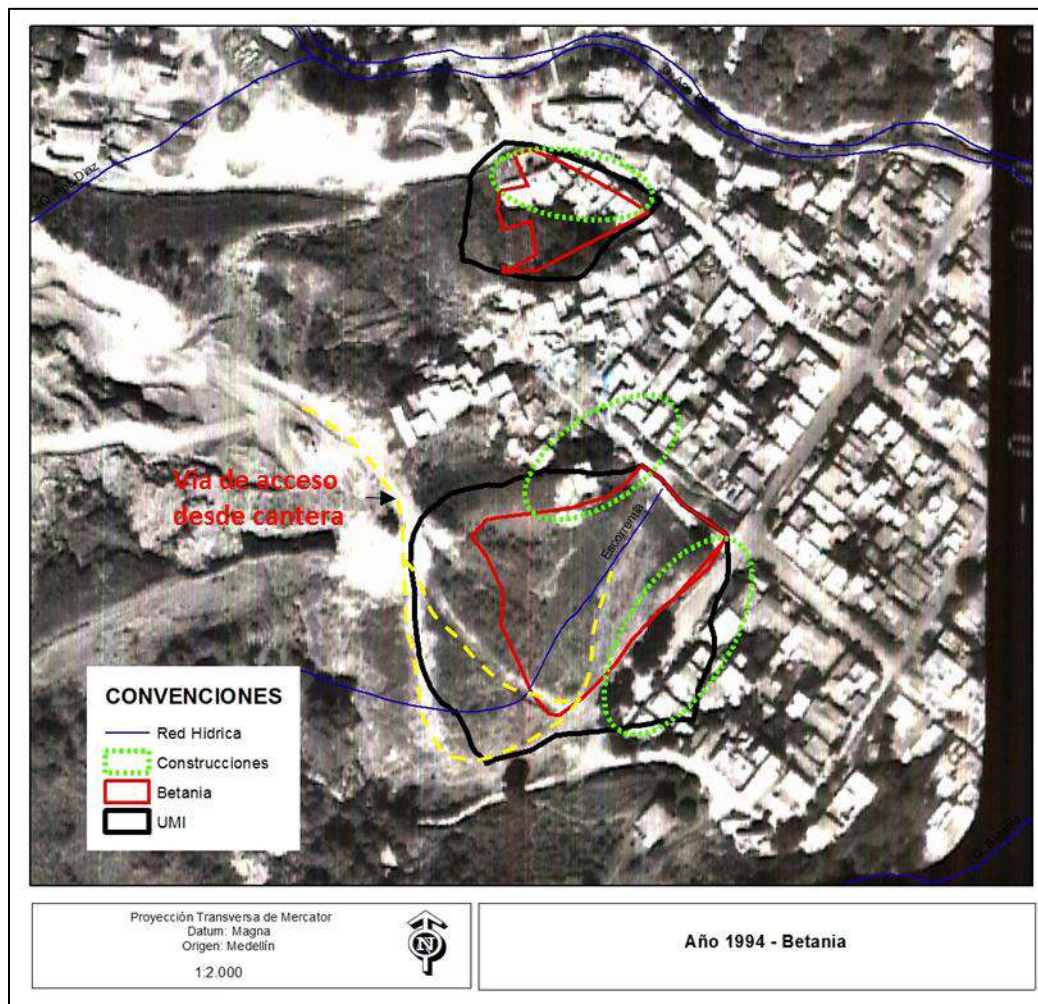


Figura 9. Fotografía aérea de 1994, polígono Betania

Para el año 2010 se observa la construcción de la placa polideportiva y parque infantil en el polígono sur (7003-1) construidos sobre un lleno de materiales provenientes de las canteras del sector, el cual está confinado con un muro de gaviones, así mismo hay un cambio en cobertura vegetal, observándose una zona de arbustos hacia el occidente del polígono. El polígono norte presenta una consolidación urbanística representada en la construcción de vivienda y senderos peatonales. No se observan movimientos en masa visibles en esta zona (Figura 10).

Geomorfológicamente el polígono sur (7003-1) sufre una transformación relacionada a la intervención antrópica como la realización de llenos y explanaciones, cambiando la morfología de laderas cóncavas a una vertiente

escalonada por las adecuaciones para la placa polideportiva y el parque infantil. Hacia el polígono norte (1312-1) continúa la consolidación urbanística que implica modificaciones de la forma de la pendiente, convirtiéndola en una ladera escalonada por la apertura de taludes y construcción de llenos para la adecuación de la zona para la construcción de vivienda.

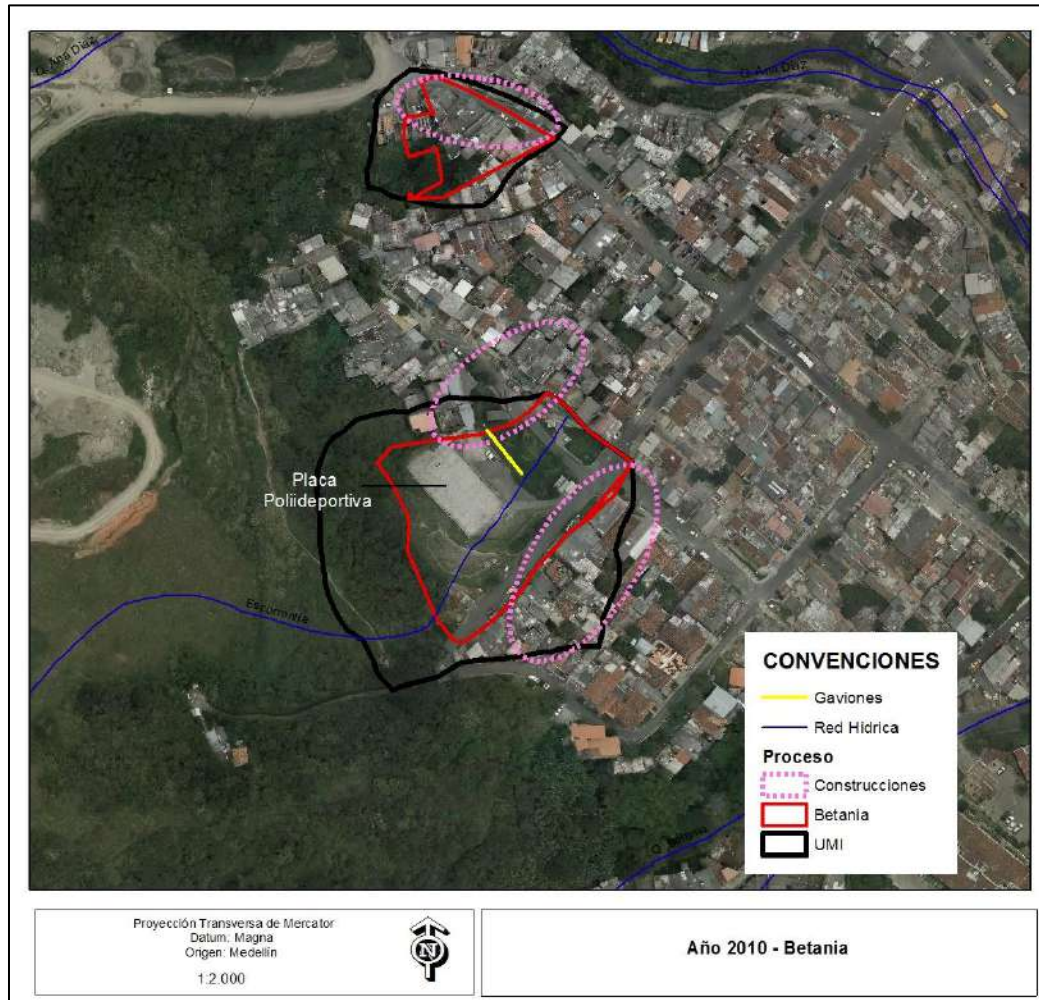


Figura 10. Fotografía aérea de 2010.

A partir del proceso de fotointerpretación llevado a cabo para el polígono Betania, se puede concluir que la zona no sufrió cambios geomorfológicos significativos sino hasta después de la década de los 90, relacionados a la modificación morfológica del polígono sur (7003-1) que paso de una ladera cóncava de fuertes pendientes a una zona de pendientes bajas, escalonada, producto de la depositación de llenos

provenientes de las canteras de la zona y que posteriormente fueron transformados y adecuados para espacio público del barrio Betania, en donde en la actualidad se ubica la placa polideportiva.

Para el polígono norte (1312-1), las laderas han sufrido una evolución en el proceso de ocupación e intervención antrópica reportada desde la fotografía del año 1989, cuya ocupación se inicia sobre la calle 34, hasta alcanzar los niveles relacionados para el año 2010.

Durante los años analizados no se identifica la presencia de procesos morfodinámicos, sin embargo la intervención antrópica que representa la conformación de llenos y apertura de taludes, así como los usos del suelo y la disposición de aguas de escorrentía y servidas, pueden ser causas de la generación de procesos no visibles a la escala de las fotografías analizadas.

6.3 UNIDADES GEOLÓGICAS PARA INGENIERÍA

Las unidades geológicas para ingeniería (UGI) que afloran en la zona del proyecto, corresponden principalmente a suelos residuales derivados de la meteorización de las rocas ígneas pertenecientes al Stock de Altavista, la cual corresponde a la unidad geológica predominante en la zona y que representa el basamento de la mayor parte de la zona estudiada. Asociado a los procesos urbanísticos e intervenciones humanas, se identifican llenos antrópicos de importantes dimensiones (Figura 11).

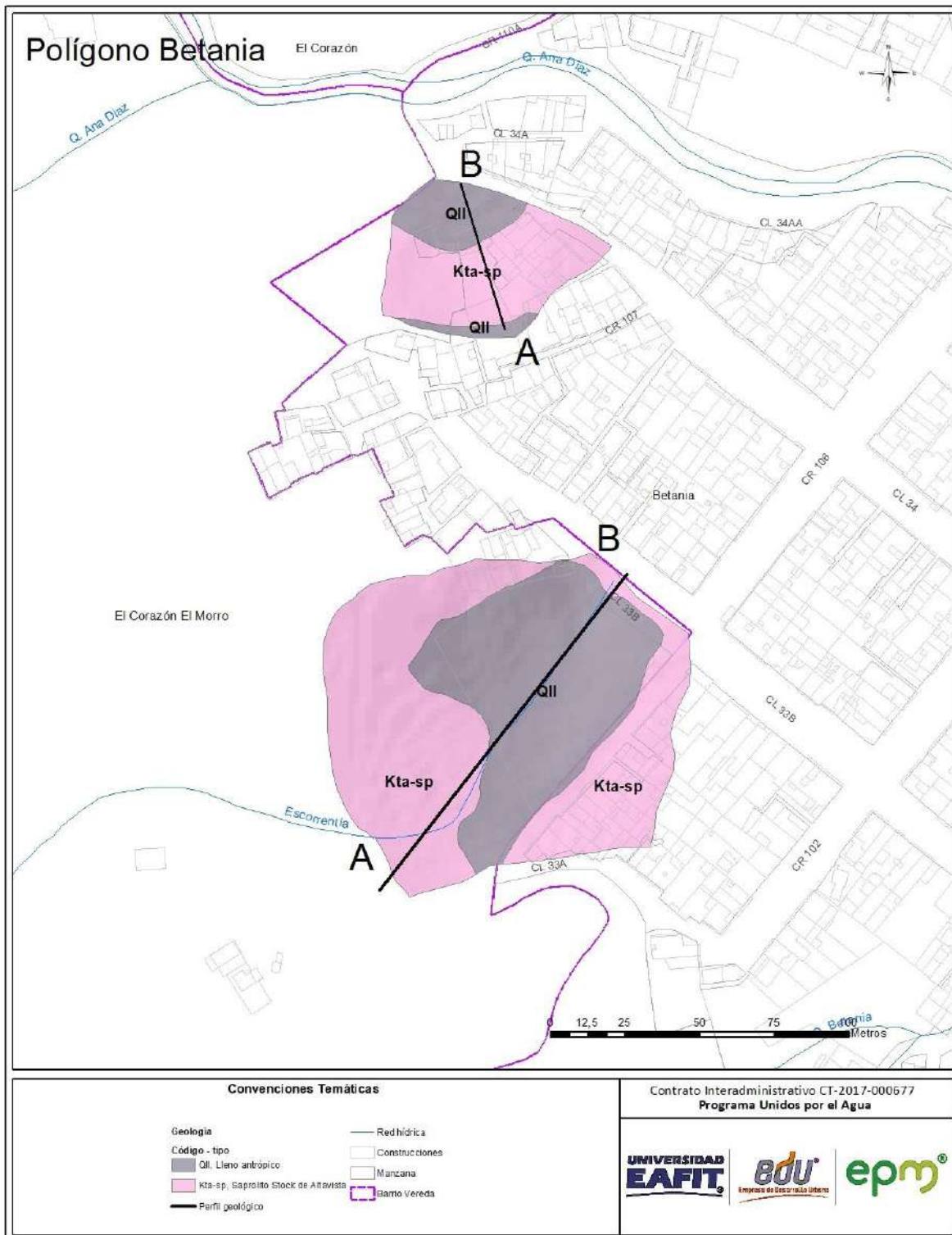


Figura 11. Geología local del polígono Betania

A continuación, se describe el perfil y las unidades geológicas para ingeniería identificadas para la zona de estudio, teniendo en cuenta para su caracterización los diferentes afloramientos encontrados en los recorridos de campo y los sondeos exploratorios ejecutados para el análisis geotécnico; no se identificaron afloramientos con presencia de estructuras que permitan un análisis de la tendencia estructural del sector. En las Figura 12 y 13 se presenta los perfiles geológicos generalizados del polígono Betania, donde se muestran las relaciones estratigráficas del sector.

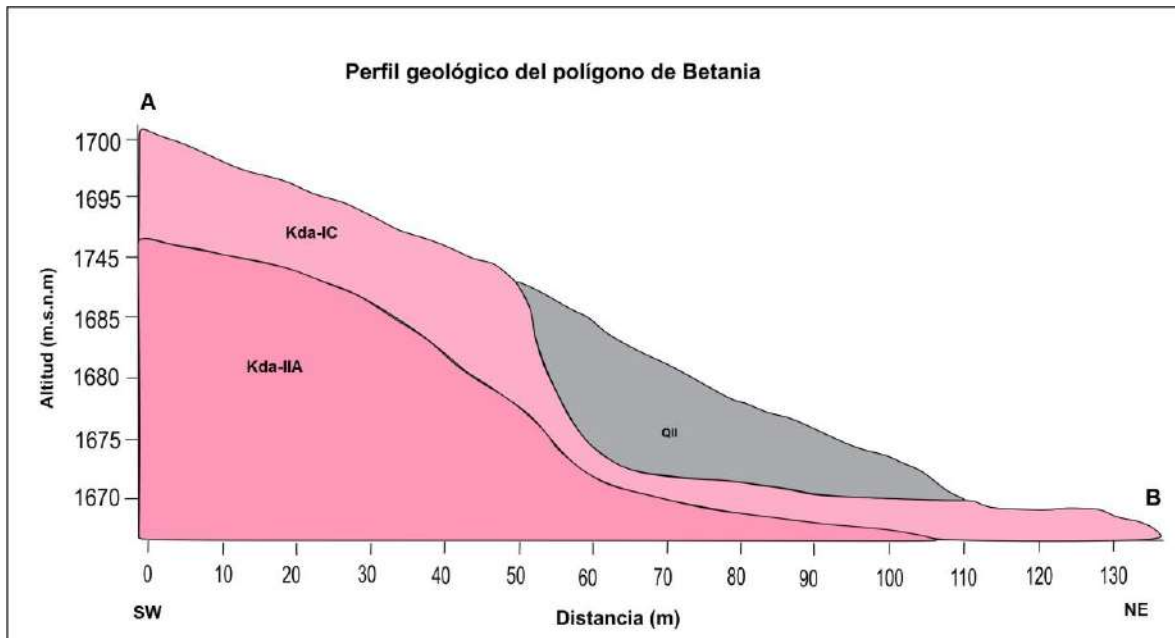


Figura 12. Perfil geológico del polígono Betania – sector sur (Polígono 7003-1)

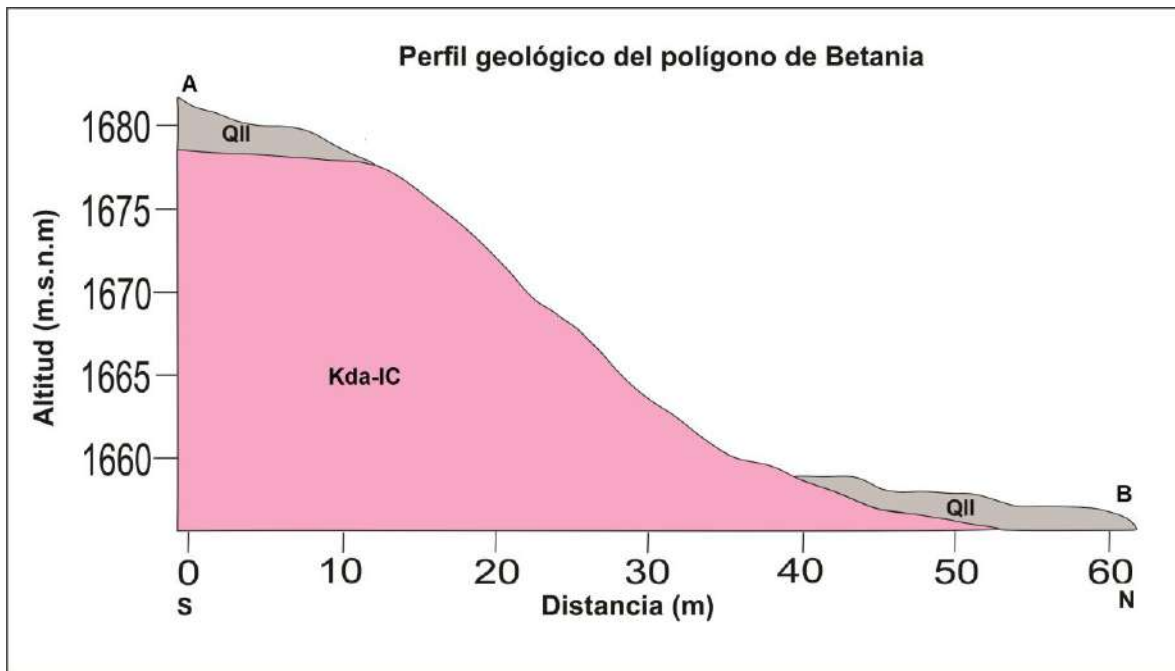


Figura 13. Perfil geológico del polígono Betania – sector norte (Polígono 1312-1)

6.3.1 Derivados de roca in situ

Stock de AltaVista (Kda): Esta unidad litológica representa el basamento rocoso de la mayor parte de la ladera estudiada. Los afloramientos en el polígono Betania son escasos y se identifican sobre un talud abierto para la construcción de viviendas.

En la zona de estudio afloran en superficie la roca meteorizada, sin que se identifiquen estratos de transición en campo, sin embargo, en los sondeos ejecutados es posible identificar el nivel IIA, correspondientes a la roca de transición o moderadamente meteorizada, la cual exhibe altos niveles de fracturamiento (nivel IIA), se observa la perforación 4, en la zona aledaña a la carrera 34.

Saprolito - nivel IC (Kda-IC): En general los saprolitos derivados del Stock de Altavista, el material conserva parte de la textura de la roca original que se caracteriza por una textura predominante limo-arenosa, con color gris amarillento y tonalidades crema. En algunos casos se conservan minerales oscuros con tonalidades verdosas y blancas asociadas a la meteorización de minerales como plagioclasa; presenta texturas correspondientes a material limoso y limo arenoso.

En afloramiento se presenta como un material fácilmente deleznable que varía de color y textura, se identifica en los taludes de las viviendas ubicadas sobre la calle 33B (Figura 14).



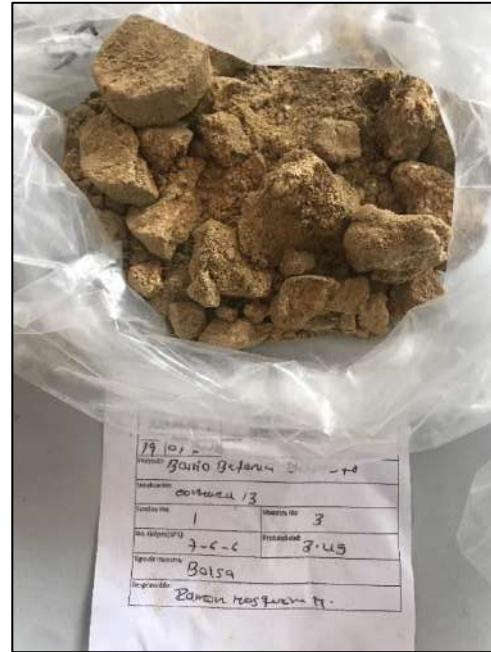
Figura 14. Stock de Altavista: saprolito o nivel IC en inmediaciones de la cancha

A nivel de perforación presenta características de textura limo arcillosa y limo arenosa, con tonalidades crema y crema con vetas rojas asociadas a la meteorización de minerales máficos. El material es deleznable y se aprecian algunas motas blancas asociadas a los minerales tipo plagioclasa (Figura 15).

Este nivel se encontró en la perforación 1 desde los 16 metros hasta 25 metros, en la perforación 2 desde 8 metros hasta 15 metros y en la perforación 3 desde 2 metros hasta 16 metros.



Perforación 2



Perforación 3

Figura 15. Saprolito del stock de Altavista en las perforaciones 2 y 3

Roca alterada II A (transición suelo –roca): Este nivel no se observó a nivel de afloramiento, pero se reporta en la perforación 4 en cercanía a la quebrada Ana Díaz, sobre la calle 34. Este material se caracteriza por fragmentos de roca en una matriz de suelo limoso; los fragmentos presentan texturas variadas entre granodiorita, brechas y gabros, facies típicas del Stock de Altavista. Los fragmentos presentan una variación entre tonalidades gris claro con presencia de plagioclasa, hasta gris oscuro con tonalidades verdosas (Figura 16).



Figura 16. Stock de Altavista en la perforación 4, a la profundidad de 7 m

6.3.2 Depósitos antrópicos

En la categoría de depósitos de origen antrópico, se identificaron en la zona de estudio, llenos de dimensiones importantes, los cuales se describen a continuación.

Llenos antrópicos (QII): Corresponden a depósitos artificiales que pueden llegar a tener una extensión y espesor importantes. La composición de estos depósitos es en extremo heterogénea, desde materiales homogéneos conformados con algunas normas técnicas hasta basura, materia orgánica y escombros simplemente vertidos, con propiedades geotécnicas pobres para cortes y capacidad portante. Dentro de la zona de estudio, este depósito es de importantes dimensiones en el sector de la placa polideportiva, en superficie puede tener un ancho aproximado entre los 25 y 60 m y de largo oscila entre los 40 y 60m.

El material de origen antrópico fue detectado en las 4 perforaciones. Están compuestos por materiales limosos - arcillosos mezclados con fragmentos de roca, zonas con materia orgánica en descomposición y en otros sectores se incluyen restos de escombros de construcción. En general estos materiales poseen

espesores variables así: en la perforación 1 alcanza 16 metros, en la P-2, 8 metros, en la P3, 2 metros y en la P4, 3 metros.

De acuerdo al reporte de la comunidad, el lleno del sector de la cancha, tiene material procedente de las canteras aledañas a la zona de estudio, escombros y basura. En la actualidad esta zona está intervenida y sobre este fue construido la cancha y el parque infantil del barrio Betania (Figura 17).



Figura 17. Características de los materiales que conforman el lleno antrópico, sector de la cancha del Barrio Betania

6.4 MORFOMETRÍA

La pendiente, como componente del relieve, se refiere al grado de inclinación del terreno o gradiente, expresado en porcentaje o grados. El mapa resultante de este análisis, muestra la distribución de las pendientes naturales del área de estudio, de acuerdo con los rangos preestablecidos. La importancia de este análisis radica en que, en la evaluación de la susceptibilidad a movimientos en masa, este análisis no se puede pasar por alto, ya que cada material superficial posee un comportamiento

geomecánico diferente, según la pendiente donde este localizado. Igualmente, el desarrollo urbanístico y el uso del suelo se encuentran restringidos por esta variable.

La zona de estudio se caracteriza por tener una topografía dominada por rangos de pendientes muy inclinadas y abruptas en una gran porción de su extensión, la mayor parte de éstas, asociado a las vertientes cortas y formas que van desde rectas a cóncavas y convexas que se extienden a lo largo de toda la zona.

En la Tabla 5 y Figura 18 se presenta la distribución de los diferentes rangos de pendientes para el polígono Betania:

Tabla 5. Distribución de la variable pendientes

Rango pendiente	Nombre	Total Área (ha)	Porcentaje (%)
1 - 3%	Muy suave	0,0248	1,8%
3 - 10%	Suave	0,042	3,0%
10 - 25%	Inclinada	0,236	17,1%
25 - 40%	Muy Inclinada	0,5328	38,7%
40 - 60%	Abrupta	0,4264	30,9%
60 - 100%	Muy Abrupta	0,1084	7,9%
>100%	Escarpado	0,008	0,6%
		1,3784	100,0%

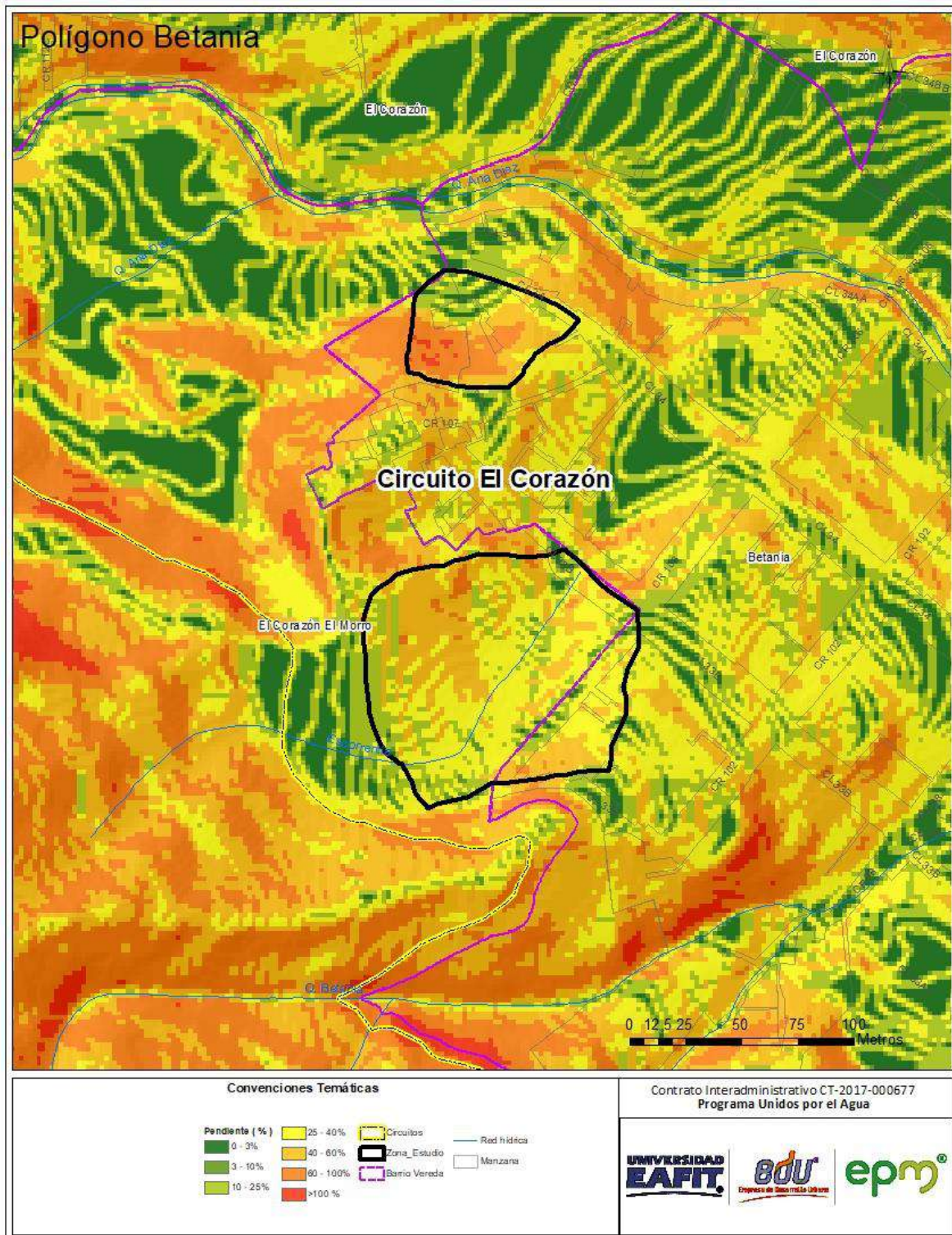


Figura 18. Mapa de morfometría del polígono Betania

Rango de pendientes 0 – 10%: Corresponde a un rango que se encuentra representado por el 4,8% del área, correspondientes a las pendientes suaves y muy suaves; corresponde a áreas modificadas antrópicamente mediante la realización de explanaciones y llenos, en la zona está asociado a la placa polideportiva, el parque infantil, y la zona ubicada hacia la entrada de la cantera La Esmeralda (Figura 19).

En este rango de pendientes, la topografía no condiciona el diseño urbanístico, pero se recomienda el cuidado con respecto a cumplir las normas técnicas en la elaboración de cortes, banquetes y llenos que normalmente son requeridos para un desarrollo urbanístico.



Figura 19. Unidad con pendientes en el rango entre 0 -10%, sector de la placa polideportiva

Rango de pendientes 10% – 25%: Está representando el 17,1% del área de interés. Esta categoría se encuentra distribuido por todo el polígono, con mayor representación en el polígono 7003-1 (polígono sur) (Figura 20).

En este rango de pendientes, la topografía condiciona moderadamente el diseño urbanístico, se requiere cuidado en el desarrollo de cortes para vías, banquetes para el establecimiento de viviendas y llenos.



Figura 20. Zonas con pendientes en el rango entre 10% – 25%, polígono 7003-1

Rango de pendientes 25% - 40%: Es el rango más representativo de la zona y comprende el 38,70% del área de la zona de estudio, corresponde a áreas distribuidas en los dos polígonos y asociados a las zonas de ladera (Figura 21).

En este rango de pendientes, la topografía condiciona de manera importante el desarrollo urbanístico, por lo que se requiere de un estudio geológico – geotécnico de detalle para su desarrollo y donde igualmente se incluyan las recomendaciones de manejo y las obras de mitigación a llevar a cabo en caso de ser necesaria la realización de cortes o llenos para la apertura de vías de acceso, o la ocupación urbana.



Figura 21 Sector occidental de la placa polideportiva, zona con pendientes en el rango entre 25% - 40%

Rango de pendientes 40% - 60%: Representa el 30,90% del área, y se localiza principalmente hacia la zona central del polígono 7003-1, y la vertiente posterior a las viviendas del polígono 1312-1 (Figura 22).

Las pendientes con este porcentaje no son aptas para urbanizaciones continuas, es un rango con características condicionadas para procesos urbanísticos y regularmente requiere obras de mitigación para su adecuación y manejo.



(a)



(b)

Figura 22. (a) Parte posterior del parque infantil en el Polígono 7003-1, (b) zona de viviendas del polígono 1213-1, con pendientes en el rango 40% - 60%

Rango de pendientes > 60%: este rango de pendientes representa el 8,50% del área del polígono, corresponde a la vertiente posterior a las viviendas del polígono 1312-1 y al sector noroccidental del polígono de la placa polideportiva en el polígono 7003-1 (Figura 23).

Las pendientes con este porcentaje no son aptas para urbanizaciones continuas, es un rango con características condicionadas para procesos urbanísticos y regularmente requiere obras de mitigación para su adecuación y manejo.



(a)



(b)

Figura 23. (a), vertiente posterior a las viviendas, (b) vertiente noroccidental de la placa polideportiva, corresponden a zonas con pendientes en el rango 60%

6.5 GEOMORFOLOGÍA LOCAL

El polígono de interés presenta características geomorfológicas contrastantes, donde los procesos exógenos y los materiales han moldeado el relieve. Teniendo en cuenta la escala del trabajo y a partir de las unidades geomorfológicas definidas por AMVA (2007), se han diferenciado las subunidades geomorfológicas de acuerdo con las características particulares que exhiben cada una, entre las que se destacan la forma, longitud de la ladera y la inclinación del terreno.

Tabla 6. Clasificación geomorfológica del polígono Betania

Unidad de paisaje	Macrounidad	Unidad	Subunidad
Valle Medio (VM)	Bloque Itagüí – San Cristóbal	Lomos (VM-BISC-L)	Ladera convexa, corta y suave
			Ladera cóncava, corta y muy inclinada
			Ladera cóncava, corta y abrupta
			Ladera cóncava, corta y muy abrupta
			Ladera en lleno, recta, corta y muy suave
			Ladera en lleno, recta, corta y suave

Unidad de paisaje	Macrounidad	Unidad	Subunidad
			Ladera en lleno, cóncava, corta y muy inclinada
			Ladera en lleno, recta, corta y abrupta

Partiendo de estos rasgos regionales se delimitan las diferentes subunidades geomorfológicas a escala 1:2.000 para el polígono Betania. A continuación se describen cada una de las subunidades geomorfológicas (Figura 24):



6.5.1 Bloque Itagüí – San Cristóbal

Lomos: Regionalmente esta unidad geomorfológica se ubica sobre la margen derecha de la quebrada Ana Díaz. A continuación se presentan las subunidades de la unidad Lomos:

Ladera convexa, corta y suave (VM-BISC-L-lcxcs): Esta unidad se ubica sobre la parte alta del sector de la cancha polideportiva, corresponde a una zona de pendientes inferiores al 10%, laderas con longitudes entre los 20 y 30 m y forma convexa. Geológicamente están asociados al saprolito del Stock de Altavista y llenos antrópicos; esta unidad ocupa el 8,86% del área total del polígono y en ella no se observan procesos erosivos (Figura 25).



Figura 25. Ladera convexa, corta y suave

Ladera cóncava, corta y muy inclinada (VM-BISC-L-lcvcmi): Esta unidad ocupa el 15,48% del área total del polígono. La unidad al sur occidente del polígono 7003-1, entre las calles 33B y la prolongación de la calle 33A, a la altura de la carrera 106; se caracteriza por presentar pendientes en el rango entre los 10 - 25%; laderas con longitudes entre los 20 y 40 m y forma cóncava. Geológicamente está asociada al

saprolito del stock de Altavista. No se observan procesos de inestabilidad en esta unidad (Figura 26).



Figura 26. Ladera cóncava corta y muy inclinada

Ladera cóncava, corta y abrupta (VM-BISC-L-lcvca): Esta unidad se ubica al occidente del polígono 1312-1 (polígono norte). Esta unidad presenta pendientes en el rango de 40- 60% laderas con longitudes entre los 30 y 40 m y forma cóncava. Geológicamente está asociada al saprolito del Stock de Altavista. La unidad ocupa el 26,64% del área total del polígono y no se observan procesos erosivos en ella (Figura 27).



Figura 27. Ladera cóncava corta y abrupta

Ladera cóncava, corta y muy abrupta (VM-BISC-L-lcvma). Esta unidad se ubica al sur del polígono 1312-1 (polígono norte). Esta unidad presenta pendientes en el rango de 40- 60%, tiene unas dimensiones aproximadas de 50 metros de ancho y altura aproximada a los 30 metros y forma cóncava. Geológicamente está asociada al saprolito del Stock de Altavista. Esta unidad puede ser la cicatriz de un antiguo deslizamiento. La unidad ocupa el 11,36% del área total del polígono, hace parte de una cicatriz de un antiguo deslizamiento. (Figura 28).



Figura 28. Ladera cóncava, corta y muy abrupta

Ladera en lleno, recta, corta y muy suave (VM-BISC-L-llrcms): Ubicada hacia la zona central del polígono 7003-1, correspondiente a la placa polideportiva y a la zona del parque infantil. Se caracteriza por ser una zona con pendientes inferiores al 3%, longitud que oscila entre los 10 y 30 m y forma recta, asociada a la intervención para la adecuación de la zona deportiva. Geológicamente está conformada por llenos antrópicos. Esta unidad ocupa un área de 11,04% del área total del polígono, esta zona presenta un movimiento lento que se visualiza en la deformación del muro de gaviones que sirve de contención al lleno (Figura 29).



Figura 29. Ladera en lleno, recta, corta y muy suave, placa polideportiva del barrio Betania

Ladera en lleno, recta, corta y suave (VM-BISC-L-Ilrcs). La unidad se localiza al norte del polígono 1312-1, sobre la calle 34, se caracteriza por presentar una pendiente inferior al 10%; longitud de no supera los 25 m y forma recta; geológicamente está asociada a un lleno de aproximadamente 8 m sobre saprolito del stock de Altavista. Esta unidad ocupa el 5,18% del área del polígono y no presenta procesos erosivos evidentes (Figura 30).



Figura 30. Unidad Ladera en lleno recta corta y suave

Ladera, cóncava, corta y muy inclinada (VM-BISC-L-Ilrcmi): Esta unidad corresponde a la ladera que rodea la placa polideportiva, presenta pendientes en el rango entre el 40 y el 60 %, longitudes inferiores a los 40 m y forma cóncava. Geológicamente están asociados al saprolito del stock de Altavista. La unidad ocupa el 13,58% del área total del polígono y no presenta procesos erosivos.



Figura 31. Ladera cóncava, corta y muy inclinada

Ladera en lleno, cóncava, corta y abrupta (VM-BISC-L-Ilcvca): Esta unidad corresponde al talud que rodea la placa polideportiva y al talud de gaviones que se ubica en la parte inferior de la cancha, presenta pendientes entre el 40 y 60 %, longitud entre los 10 y 15 m y forma cóncava. Geológicamente están asociados a llenos antrópicos. La unidad ocupa el 7,87% del área total del polígono y presenta evidencias de movimientos en masa activos como se evidencian en las fotografías (Figura 32).



Figura 32. Ladera en lleno cóncava corta y abrupta

6.6 MORFODINÁMICA

En el área de estudio se identifican pocos procesos morfodinámicos, correspondiente principalmente a procesos de movimientos en masa, estos procesos son generados por factores naturales como las características geológicas, geomorfológicas y topográficas de la zona y por intervenciones antrópicas asociados la apertura de taludes para la construcción de vivienda y al manejo de aguas servidas.

A continuación se presenta la información sobre procesos morfodinámicos de acuerdo con la disponibilidad del reporte de eventos y los procesos identificados en la elaboración de este trabajo.

6.6.1 Reporte histórico de eventos

Para el análisis del registro histórico de eventos del polígono de estudio se recopila la información que contienen los reportes de las bases de datos del DAGRD y del Departamento Administrativo de Planeación, al igual que los estudios llevados a cabo en la zona, esto con el fin de verificar la ocurrencia de movimientos en masa en la zona y que debido a las condiciones de intervención antrópica no sean posibles de determinar. Este registro de eventos igualmente sirve como insumo para determinar la continuidad o recurrencia de los movimientos en masa identificados para el polígono en estudio.

Para el polígono en estudio, la base de datos de visitas de DAGRD reporta la ocurrencia de 7, de las cuales 1 corresponde a eventos de movimiento en masa, 4 a problemas estructurales, 1 a humedades y 1 a inundaciones (Figura 33)



Figura 33. Eventos reportados por el DAGRD (Octubre de 2016)

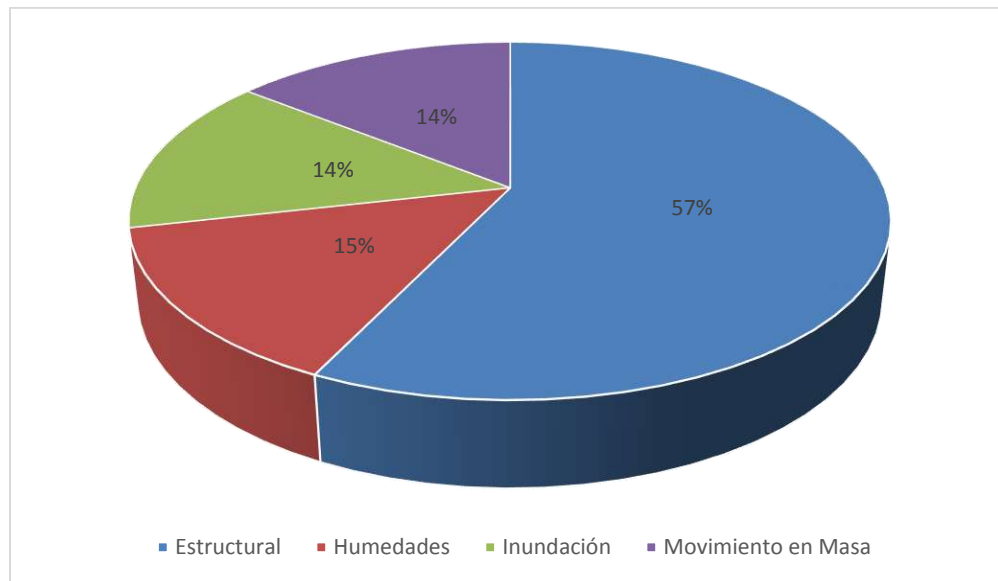


Figura 34. Reporte eventos DAGRD para el polígono Betania

Además de los reportes anteriormente descritos, dentro del inventario de eventos con que cuenta el Departamento Administrativo de planeación y los identificados en los estudios llevados a cabo en la zona, se reporta la presencia de dos movimientos en masa activos en el polígono 7003-1, que se identificaron el trabajo de campo.

6.6.2 Identificación de procesos morfodinámicos

Dentro del polígono en estudio, los movimientos en masa identificados son pocos y corresponden principalmente a deslizamientos con características rotacionales, siendo más predominantes hacia las unidades geomorfológicas de mayor pendiente localizadas en las diferentes laderas predominantes en la zona evaluada.

Estos movimientos en masa tienen origen por diferentes factores, tanto naturales como antrópicos. Entre las causas naturales se encuentran la saturación de los suelos por períodos intensos de lluvias, además de la pendiente, la forma y longitud de las laderas. Las causas atribuidas a factores antrópicos son principalmente sobrecargas, pérdida de soporte en taludes, ausencia de sistemas de drenaje o en su defecto sistemas mal contruidos e inadecuado uso y manejo del suelo.

Durante el recorrido de campo y caracterización del polígono Betania se identificaron tres procesos de remoción en masa, el primero corresponde a un proceso morfodinámicos superficial y dimensiones pequeñas, ubicado sobre la

vertiente entre la cancha polideportiva y el parque infantil; su origen está relacionado directamente a la ausencia de obras de drenaje para aguas de escorrentía sobre el parque infantil. El segundo está relacionado al movimiento que está teniendo el lleno donde se ubica la cancha, y que se evidencia en la deformidad del muro de gaviones que fue construido como contención para este. El tercero corresponde a la cicatriz de un movimiento en masa antiguo, ubicado en la parte posterior de las viviendas que están sobre la calle 34, este conserva las características principales del proceso, como son forma cóncava, pendientes muy abruptas y un escarpe que oscila entre los 6 y 7 m; se destaca que en parte alta de esta cicatriz se ubican construcciones y huertas caseras (Figura 35 y Figura 36).

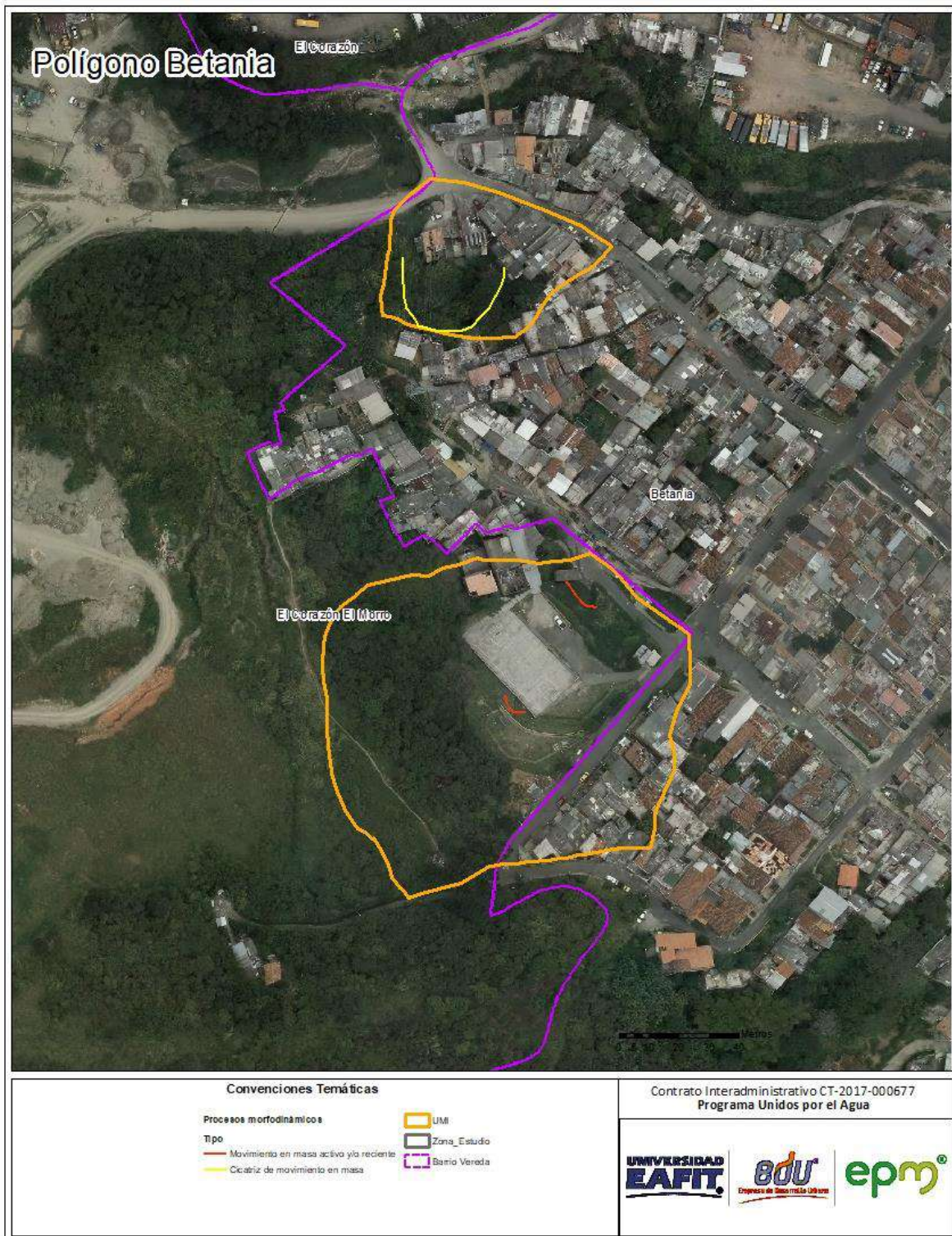


Figura 35. Procesos morfodinámicos en el polígono Betania



(a)



(b)



(c)

Figura 36. (a) Zona de proceso activo, sector la cancha. (b) Cicatriz de deslizamiento a la altura de calle 34, (c) Muro de gaviones deformado

En el polígono Betania no hay evidencias de procesos morfodinámicos asociados a la dinámica fluvial, la única corriente en el área de influencia, corresponde a un drenaje intermitente que se encuentra cubierto en el sector de la placa polideportiva y que no ha tenido reportes de afectación en la zona.

6.7 SUELOS DE PROTECCIÓN Y USO GENERAL DEL SUELO

Basado en el Acuerdo 48 de 2014, el polígono en estudio se localiza en suelo urbano y sobre él se identifican categorías del suelo de protección correspondientes a áreas de la estructura ecológica principal y áreas de amenaza, área de producción agroforestal y minera en transición, siendo las dos primeras las más representativas en la zona de estudio (Figura 37).

Las áreas de la Estructura Ecológica Principal incluyen las áreas protegidas públicas, así como las áreas de interés estratégico que contienen el sistema hidrográfico (ríos y quebradas con sus retiros), el sistema orográfico (cerros tutelares), los elementos estructurantes de la red de conectividad ecológica y las áreas de interés recreativo y paisajístico (Acuerdo 48 de 2014). Para el polígono en estudio, estas áreas de interés estratégico corresponden a nodo proyectado de la red de conectividad ecológica, ubicado hacia la zona occidental del polígono de estudio.

Las áreas de amenaza y riesgo, que incluye las áreas de amenaza alta (por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales) y las áreas de alto riesgo no mitigable, así como las áreas con condiciones de riesgo (Acuerdo 48 de 2014). Para este caso corresponde a la zona con condición de riesgo que corresponde al área de análisis de este estudio.

Las Áreas de protección para la producción que comprende las áreas destinadas a la producción o de explotación de recursos naturales (Acuerdo 48 de 2014); en la zona de estudio están presentes la de producción Agroforestal y las Áreas Mineras en Transición, con muy baja representación.

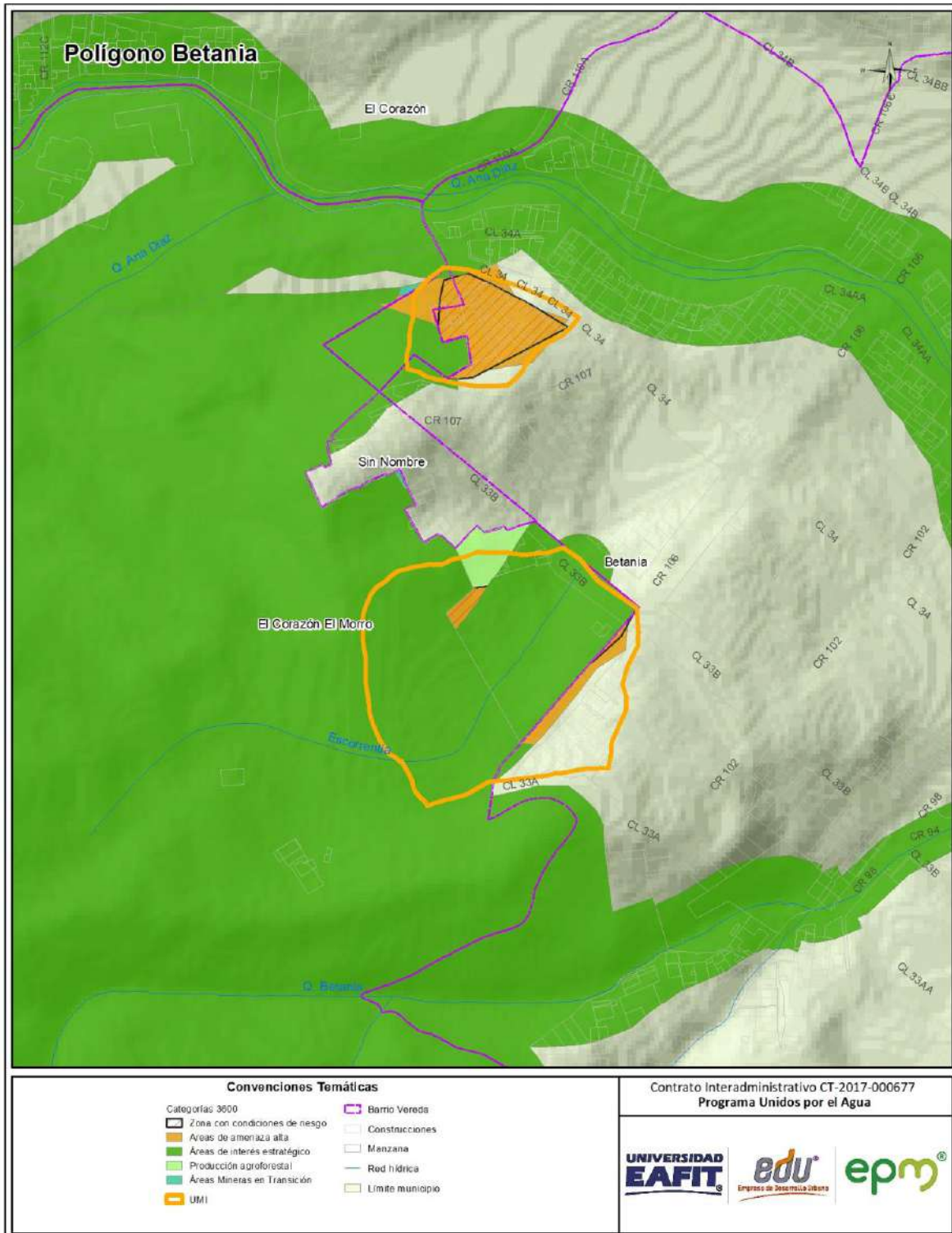
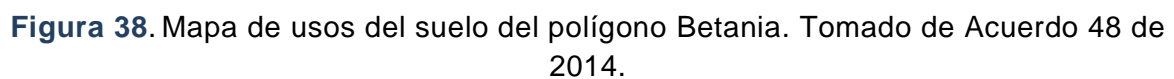


Figura 37. Clasificación del suelo, polígono Betania. Tomado de Acuerdo 48 de 2014.

Igualmente, en el Acuerdo 48 de 2014 se define que los usos del suelo corresponden a la distribución espacial de las actividades desarrolladas por agentes públicos y privados, que permiten establecer las características de animación de la ciudad y la utilización y ocupación del suelo. Estas normas generales buscan optimizar las infraestructuras de urbanización y fomentar relaciones socio-económicas más eficientes a partir de la interrelación entre las actividades, mitigando los impactos generados y atendiendo a las características del territorio. Teniendo en cuenta éstas premisas y dicho acuerdo, para el polígono de Betania se define como uso predominante el de tipo residencial (Figura 38).

Se destaca que el uso residencial se asocia a todo terreno que de acuerdo con el concepto general de urbanización se adecúe específicamente para el uso principal de la vivienda, constituye un desarrollo urbanístico residencial, éstos se podrán desarrollar en cualquier parte del área urbana, con excepción de las zonas de alto riesgo no mitigable y las zonas con condiciones de riesgo hasta tanto los estudios de detalle no sean realizados (Acuerdo 48 de 2014).

En cuanto a las regulaciones sobre la altura permitida para las construcciones según el Acuerdo 48 de 2014 para el polígono Betania se establece un tope máximo de aprovechamiento de 3 pisos (Z4_CN3_11) dentro del polígono sur (1312-1) y de 2 pisos (Z4_CN3_10) para el polígono norte (7003-1).



7. ASPECTOS GEOTÉCNICOS

A continuación se presentan los principales aspectos geotécnicos del polígono, los cuales son el resultado de las visitas de inspección y reconocimiento, de las exploraciones de campo, de los resultados de laboratorio y de los análisis de estabilidad.

7.1 EXPLORACION DE CAMPO

Basado en las características topográficas y las formaciones geológicas de la zona a estudiar, se planteó un programa de exploración, que permitiera definir el modelo geológico y geotécnico del polígono y sus características estratigráficas como físico-mecánicas, insumo fundamental en los análisis de estabilidad y en la definición y diseño de las obras de estabilización que se puedan requerir.

El trabajo de exploración contempló la ejecución de cuatro (4) perforaciones exploratorias, para definir dos perfiles o secciones de análisis, cada uno con dos sondeos.

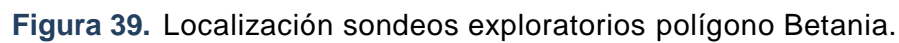
El programa de exploración directa se realizó con taladros mecánicos, por el sistema de rotopercusión. La localización de los sondeos estuvo igualmente gobernada por la disponibilidad de espacios aptos para tal fin, pues como se puede verificar las condiciones de altas pendientes y la presencia de viviendas e infraestructura dificultaban la ubicación de estos.

Los sondeos definidos para el análisis fueron distribuidos de tal manera que se lograra la mayor cobertura del área a evaluar y adicionalmente se ubicaron para conformar pares de sondeos con el fin de establecer perfiles estratigráficos. Estos sondeos fueron denominados en este informe como P-1 hasta P-4. La localización geográfica de los sondeos se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 7. Localización geográfica de los sondeos.

Sondeo	Coordenada Norte	Coordenada Este
P1	828953	1182449
P2	828986	1182471
P3	828947	1182582
P4	828940	1182621

En la Figura 39 se representa la ubicación de cada uno de los sondeos.



Las perforaciones que se ejecutaron en este polígono alcanzaron profundidades entre 15 y 25 m, donde se recuperaron tanto muestras alteradas como inalteradas.

En la Tabla 8 se indica la profundidad alcanzada en cada uno de los sondeos. De cada sondeo ejecutado se levantó una columna estratigráfica que contiene la descripción de los materiales y sus propiedades, las cuales son presentadas en este documento en el Anexo 2.

Tabla 8. Numero de sondeos exploratorios y longitud alcanzada.

Sondeo	Profundidad (m)
P-1	25.0
P-2	15.0
P-3	16.0
P-4	15.0

Durante la campaña exploración e investigación del subsuelo para cada uno de los sondeos ejecutados se llevó a cabo el ensayo de penetración estándar (SPT) a intervalos de 1.0 m, el cual permite conocer el número de golpes requerido al introducir un muestreador 45 cm, obteniendo un valor de N que corresponde a la suma de los golpes necesarios para penetrar los últimos 30 cm; este valor resulta útil en la determinación de la consistencia del material y la obtención de parámetros geomecánicos que caracterizan del subsuelo que conforma los diferentes estratos a partir del uso de correlaciones disponibles en la literatura.

Metro a metro para cada uno de los sondeos proyectados se toman muestras del material, el cual es visualmente caracterizado y almacenado en bolsas plásticas con el fin de preservar sus características propias de estado límite, estas se conocen como muestras alteradas o remoldeadas por ser extraídas con un muestreador estándar, las muestras representativas son llevadas al laboratorio donde se les practican ensayos de clasificación para conocer el tipo de suelos, propiedades como humedad y límites de Atterberg. Adicionalmente se toman muestras inalteradas, extraídas con tubo Shelby, las cuales por la forma en que fueron recuperadas permiten obtener a través de ensayos específicos, como corte directo y compresión confinada, parámetros de resistencia que posteriormente son comparados con los obtenidos a través de las correlaciones disponibles en la literatura especializada y que se apoyan en los resultados obtenidos del ensayo en campo SPT. En la Figura 40 y Figura 41 se presentan los muestreadores utilizados.



Figura 40. Muestreador estándar para el ensayo SPT



Figura 41. Muestreador de pared delgada

7.2 RESULTADOS Y ANALISIS DE LABORATORIO

Finalizado el trabajo de los sondeos o exploración directa, las muestras obtenidas en estos fueron llevadas al laboratorio de suelos, donde el equipo técnico conformado por geólogos y geotecnistas inspeccionaron los materiales y definieron para cada sondeo, una columna estratigráfica del material que compone el terreno, para posteriormente integrar la información de la totalidad de sondeos y establecer el modelo geológico de la zona, verificando y ajustando las descripciones dadas por el operario técnico que ejecuta el trabajo de exploración.

Una vez se tiene el perfil estratigráfico del subsuelo se seleccionaron las muestras representativas de cada estrato las cuales fueron enviadas al laboratorio de suelos en el que se practicaron diferentes ensayos de caracterización. Para las muestras remoldeadas tomadas con el muestreador estándar se llevaron a cabo ensayos como humedad natural, límites de Atterberg que dieron como resultado los límites de consistencia e índice de plasticidad y el ensayo de granulometría que permite la clasificación del material por el método U.S.C.S o ASHTO. Sobre las muestras inalteradas tomadas en tubos Shelby se llevaron a cabo ensayos como corte directo o compresión inconfiada que permitieron la obtención de las propiedades de resistencia de los suelos.

La siguiente tabla contiene la cantidad de muestras analizadas por cada tipo de ensayo:

Tabla 9. Tipos de ensayos y cantidad de muestras analizadas.

Tipo de ensayo	Cantidad
Limite Liquido	24
Limite Plástico	24
Humedad Natural	24
Granulometría por lavado sobre tamiz N° 200	24
Corte directo CD	6

En la tabla siguiente se presenta un resumen de los resultados de los ensayos realizados a las muestras recuperadas.

Tabla 10. Resumen de los ensayos de laboratorio.

RESULTADOS ENSAYOS DE LABORATORIO									
Ensayos Sondeo-Muestra	Humedad Natural (%)	Límite líquido (%)	Limite plástico (%)	Índice plástico (%)	Pasa malla 200 (%)	Cohesión Kpa	Ang Fricción (°)	Peso unitario (KN/m3)	Clasificación USCS
P1-M2	27.9	47.3	20.4	26.9	58.0				CL
P1-M5	30.3	49.4	23.6	25.8	57.9				CL
P1-M6	24.3					21.2	22.7	19	
P1-M7	23.2	63.0	26.8	36.2	65.3				CH
P1-M9	22.9	52.9	27.8	25.2	59.2				CH
P1-M11	44.2	-	-	NP	39.6				SC
P1-M12	21.9	61.7	28.6	33.1	74.1				CH
P1-M17	14.8	-	-	NP	32.4				SM
P1-M20	9.4	-	-	NP					SM
P1-M23	24.4	-	-	NP	28.6				SM
P2-M2	28.4	47.7	30.4	17.3	57.7				ML
P2-M4	22.1	37.0	20.3	16.7	44.1				SC
P2-M6	28.9	37.7	23.6	14	8.2				SC
P2-M7	13.5					10.7	44.2		

RESULTADOS ENSAYOS DE LABORATORIO									
Ensayos Sondeo-Muestra	Humedad Natural (%)	Límite líquido (%)	Limite plástico (%)	Índice plástico (%)	Pasa malla 200 (%)	Cohesión Kpa	Ang Fricción (°)	Peso unitario (KN/m3)	Clasificación USCS
P2-M8	23.4	63.4	23.4	40	79.1				CH
P2-M10	19.2	39.6	18.6	21	48.4				SC
P3-M3	15.2	44.1	19.5	24.6	68.6				CL
P3-M6	6.8	32.9	17.5	15.4	40.8				SC
P3-M7	13	49.9	26.6	23.3	84.1				CL
P3-M9	7.9	39.7	19.1	20.6	43.9				SC
P3-M11	8.9	47.7	20.7	27.1	58.7				CL
P3-M13	10.6	48.9	19.5	29.4	69.4				CL
P3-M15	11.6	44.2	18.5	25.7	74				CL
P4-M1	25.4	48.4	21.4	27	59.4				CL
P4-M2	26.6	47.4	22.5	24.9	65.7				CL
P4-M3						11.8	16.7	18	

7.3 ANALISIS GEOTECNICO

Con base en la caracterización geológica y los resultados del programa de exploración, así como los resultados de los diferentes ensayos practicados a las muestras seleccionadas, se realizó el análisis geotécnico que, basado en la definición y caracterización del modelo geológico y geotécnico, permitió realizar los análisis de estabilidad de las zonas evaluadas.

7.3.1 Estratigrafía y definición de parámetros geomecánicos

Concluida la etapa de exploración del subsuelo, la revisión y agrupación de muestras y los ensayos de laboratorio, se ajustaron y complementaron perfiles representativos de la estructura del terreno por medio de la definición de columnas estratigráficas en cada sondeo y su posterior correlación de acuerdo con las observaciones en campo y el criterio de los profesionales involucrados.

Estratigrafía

Para el sector del polígono Betania se detectaron materiales antrópicos en superficie en los 4 sondeos realizados (Anexo 2), en los sondeos 1 y 2 correspondientes al perfil 1 con profundidades hasta 16 metros, en las perforaciones 2 y 3 correspondientes al perfil 2 hasta 3 metros de profundidad, supra yaciendo los materiales antrópicos se observaron el saprolito del Stock de Altavista, específicamente el perfil 1 C en las perforaciones 1,2 y 3. En la perforación 4, roca meteorizada IIA. A continuación, se hace una descripción de los estratos identificados y sus variaciones significativas.

- **Llenos antrópicos:** El material de origen antrópico fue detectado en las 4 perforaciones. Están compuestos por materiales limosos - arcillosos mezclados con fragmentos de roca, zonas con materia orgánica en descomposición y en otros sectores se incluyen restos de escombros de construcción. En general estos materiales poseen espesores variables así: en la perforación 1 alcanza 16 metros, en la P-2 8 metros, en la P3 2 metros y en la P4 3 metros.

Clasificación USC: CL-CH y SC.

Humedad natural: Varía entre 13.5 y 30.3%

Límite líquido: Varía entre 37.0% y 63.0%

Índice plástico: Varía entre 14.04 y 36.21%

Pasa malla 200: Varía entre 44.13 y 74.08%

- **Saprolito el Stock de Altavista IC:** Correspondiente al nivel superior del perfil de meteorización, se encontró en la perforación 1 desde 16 metros hasta 25 metros, en la perforación 2 desde 8 metros hasta 15 metros y en la perforación 3 desde 2 metros hasta 16 metros. Compuesto por arenas y arcillas. Las siguientes son las propiedades físicas principales:

Clasificación USC: SC-SM Y CL

Humedad natural: Varía entre 6.8 % y 29.38%

Límite líquido: Varía entre 32.9% y 63.42%

Índice plástico: Varía entre 15.4% y 40%

Pasa malla 200: Varía entre 40.8% y 79.16%

- **Roca alterada II A:** Se encontró en la perforación 4 corresponde a transición suelo roca, se encontraron fragmentos de roca en matriz de suelo limoso.

Definición de parámetros geomecánicos

Los parámetros geomecánicos se obtuvieron a partir de la información recolectada de los sondeos exploratorios y de los análisis de los resultados de los diferentes ensayos practicados a las muestras extraídas en cada uno de ellos, teniendo en cuenta también el comportamiento del suelo a partir del ensayo SPT realizado en campo y los valores de referencias bibliográficas de reconocidos autores. Al analizar esta información en conjunto es posible conocer las propiedades del suelo de manera aproximada.

En la literatura especializada existen diversas correlaciones entre el valor de N, obtenido del ensayo SPT, y los parámetros de cohesión y ángulo de fricción, en éste a partir de ecuaciones se estiman estos valores, los cuales son usados para el cálculo de la capacidad portante del terreno. Los valores obtenidos a través de las correlaciones son analizados por el personal técnico de acuerdo a su experiencia y conocimientos sobre la zona de objeto de estudio.

De las correlaciones disponibles para la obtención de parámetros como cohesión y ángulo de fricción que se encuentran en la literatura, se tiene la ecuación propuesta por Bowles la cual permite obtener un valor de N corregido que posteriormente permite una mejor aproximación a los valores de resistencia. Dicha ecuación tiene en cuenta correcciones por confinamiento, energía del martillo, longitud de las barras de perforación, por la toma muestras y finalmente por el diámetro de la perforación.

La ecuación propuesta por Bowles (1988) para el valor de N corregido se la define de la siguiente manera:

$$N_s = N * C_n * \eta_1 * \eta_2 * \eta_3 * \eta_4$$

Donde:

N : N de Campo

C_n : Corrección por confinamiento.

η_1 : Corrección por energía del martillo.

η_2 : Corrección por longitud de barras de perforación

η_3 : Corrección por tomamuestras.

η_4 : Corrección por diámetro de la perforación

Con el valor de N corregido a partir de lo anterior y los resultados de laboratorio obtenidos para cada estrato se ajusta el parámetro de cohesión y fricción que se definirá para cada material siendo congruente con las observaciones realizadas en campo.

Para cada estrato se hizo un análisis de los parámetros obtenidos por cada una de las correlaciones disponibles en la literatura, despreciando aquellos valores que no resultaban representativos con base en la experiencia del equipo técnico que adelanta el presente estudio. Las correlaciones usadas se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 11. Correlaciones utilizadas para la definición de parámetros geomecánicos.

CORRELACIONES USADAS PARA DETERMINAR PARÁMETROS DE RESISTENCIA A PARTIR DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT)	
Kulhawy y Mayne (1990)	$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{N_{60}}{12.2 + 20.3 \left(\frac{\sigma_0}{Pa} \right)^{0.34}} \right)$
Wolff (1989)	$\phi = 27.1 + 0.3 \cdot N_{corr} - 0.00054 N_{corr}^2$
Hatanaka y Uchida (1996)	$\phi = \sqrt{20 \cdot N_{corr}} + 20$ $\phi = \sqrt{20 \cdot N_{corr}} + 17$
Parra y Ramos (2006)	$\phi = 5.35 \ln(N) + 14.44$ $Cu = 0.22 \cdot \ln(N) - 0.4$
Müller (1970)	$\phi = 24 + 5.77 \ln(0.1667 N_{SPT})$
Peck	$\phi = 28.5 + 0.25 N_{145}$
Peck, Hanson y Thornburn	$\phi = 26.25 * \left(2 - e^{\left(-\frac{N_{145}}{62} \right)} \right)$
Kishida	$\phi = 15 + \sqrt{(20 * N_{145})^{0.34}}$
Schmertmann	$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{N_{60}}{43.3} \right)^{0.34}$
Japan National Railway	$\phi = 27 + 0.1875 * N_{145}$
Japan Road Bureau	$\phi = 15 + (9.375 * N_{145})^{0.5}$
Stroud (1974)	$C_u = K \cdot N [kN/m^2]$ $K \begin{cases} 3.5 \text{ kN/m}^2 \\ 6.5 \text{ kN/m}^2 \end{cases}$
Hara y otros (1971)	$C_u = 29 \cdot N^{0.72} [kN/m^2]$
Mesri (1989)	$Cu = 0.22 * \sigma_0$

Para cada uno de los sondeos ejecutados se corrigió el valor de N de campo a partir de la ecuación propuesta por Bowles y hallando los parámetros de cohesión y fricción según los golpes, delimitando dentro de cada sondeo los estratos litológicos que se identificaron en el mismo. Posteriormente se hizo un análisis para cada estrato, agrupando los parámetros de cohesión y fricción obtenidos de cada sondeo para el estrato correspondiente, los resultados se presentan en el Anexo 3.

Con la información anterior se procedió a la definición de los parámetros para cada estrato, ajustándose además con los resultados de la modelación de la problemática que se presenta en campo y que se evidenció durante los recorridos del equipo técnico. En cada uno de los casos se obtuvo un valor promedio, mínimo y máximo de cohesión y fricción para cada correlación utilizada, obteniendo a partir de su análisis los parámetros geomecánicos característicos para cada material.

A continuación, se detallan los parámetros de resistencia de los diferentes estratos que conforman el perfil geológico-geotécnico:

Lleno antrópico Perfil 1.

Realizado con las perforaciones 1 y 2 los valores encontrados con las correlaciones varían para el ángulo de fricción entre 28° y 33° (ignorando la propuesta de Kulhaway) y entre 16 Kpa y 60 Kpa para la cohesión (ignorando las propuestas de Hara).

Los resultados de ensayos de caracterización geomecánica realizados sobre muestras de este material arrojaron los siguientes resultados (Anexo 3):

Tabla 12. Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio del lleno antrópico.

Ensayo	Fricción ($^{\circ}$)	Cohesión (Kpa)
Corte CD	39	0
Corte CD	22.7	21

A continuación se muestran los parámetros geomecánicos de lleno obtenidos a través de tratamiento estadístico:

Tabla 13. Parámetros geomecánicos del lleno antrópico

	Fricción ($^{\circ}$)	Cohesión (Kpa)
Media	29	18
Desviación	2	2
Mínimo	26	16
Máximo	31	20

Sin embargo para los análisis de estabilidad se utilizaron un ángulo de fricción interna $F_i=20^{\circ}$ y Cohesión $C=6$ Kpa ya que debido a la heterogeneidad del material los valores obtenidos por medio del número de golpes y los ensayos de laboratorio no se consideran representativos. Los valores fueron calibrados realizando análisis de estabilidad de tal manera que los factores de seguridad obtenidos reflejaran la situación actual y de acuerdo al criterio del geotécnista con la revisión de las muestras recuperadas y enviadas al laboratorio.

Lleno antrópico Perfil 2.

Realizado con las perforaciones 3 y 4 Los valores encontrados con las correlaciones varían para el ángulo de fricción entre 24° y 30° (ignorando la propuesta de

Kulhaway) y entre 7 Kpa y 35 Kpa para la cohesión (ignorando las propuestas de Hara).

A continuación se muestran los parámetros geomecánicos de lleno obtenidos a través de tratamiento estadístico:

Tabla 14. Parámetros geomecánicos del lleno antrópico

	Fricción (°)	Cohesión (Kpa)
Media	27	7.5
Desviación	2	0.5
Mínimo	24	7
Máximo	30	8

Sin embargo para los análisis de estabilidad se utilizaron un ángulo de fricción interna $F_i=25^\circ$ y Cohesión $C=2$ Kpa ya que debido a la heterogeneidad del material los valores obtenidos por medio del número de golpes y los ensayos de laboratorio no se consideran representativos.

Los parámetros fueron obtenidos a partir de análisis de estabilidad calibrando los resultados de tal manera que fueran coherentes con la situación actual y teniendo en cuenta el criterio del geotécnista.

Saprolito IC Perfil 1.

En las perforaciones 1 y 2 no fue posible realizar análisis estadístico para el saprolito ya que no se pudo obtener el valor N ya que se presentó rechazo en ese estrato.

Sin embargo fue posible obtener muestra inalterada en la perforación 2 a la cual se realizó ensayo de Corte Directo CD.

Los resultados de ensayos de caracterización geomecánica realizados sobre muestras de este material arrojaron los siguientes resultados, los cuales fueron utilizados en los análisis de estabilidad:

Tabla 15. Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio saprolito

Ensayo	Fricción (°)	Cohesión (Kpa)
Corte CD	44.2	10.7

Saprolito IC Perfil 2.

Realizado con las perforaciones 3 y 4 Los valores encontrados con las correlaciones varían para el ángulo de fricción entre 32° y 37° y entre 29 Kpa y 32 Kpa para la cohesión (ignorando las propuestas de Hara y Stroud).

Los resultados de ensayos de caracterización geomecánica realizados sobre muestras de este material arrojaron los siguientes resultados:

Tabla 16. Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio del saprolito IC.

Ensayo	Fricción (°)	Cohesión (Kpa)
Corte CD	25.4	39.9

A continuación, se muestran los parámetros geomecánicos del saprolito IC obtenidos a través de tratamiento estadístico:

Tabla 17. Parámetros estadísticos saprolito IC.

	Fricción (°)	Cohesión (Kpa)
Media	31	30.5
Desviación	2	1.5
Mínimo	27	29
Máximo	32	32

Para los análisis de estabilidad se utilizaron los parámetros estadísticos obtenidos a partir del número de golpes N.

Transición suelo roca IIA.

En este estrato el cual solo se encontró en la perforación 4 correspondiente al perfil 2 no fue posible calcular parámetros a partir del número de golpes N, sin embargo fue posible tomar muestra inalterada a 3.45 metros de profundidad con la cual se realizó ensayo de corte Directo CD.

Los resultados de ensayos de caracterización geomecánica realizados sobre muestras de este material arrojaron los siguientes resultados:

Tabla 18. Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio Transición suelo roca IIA.

Ensayo	Fricción (°)	Cohesión (Kpa)
Corte CD	16.7	11.8

Sin embargo no se consideran estos datos representativos por ser un dato puntual. Para el análisis de estabilidad se utilizó el mismo valor de cohesión utilizado para el saprolito IC ya que es el mismo material que compone la matriz del perfil IIA, el ángulo de fricción utilizado es de 35° ya que este material cuenta con fragmentos y bloque de roca en matriz arenosa.

7.3.2 Definición de modelos geológico-geotécnicos

Una vez terminado el programa de exploración y obtenidos los resultados de laboratorio, se asignó a los perfiles topográficos, la información geológica y geotécnica, construyendo de esta manera el modelo de análisis, que involucra la estratigrafía, las características físicas y mecánicas de los estratos, la presencia de nivel freático entre otros.

Como se mencionó anteriormente, para el polígono Betania se levantaron dos (2) perfiles topográficos, con los cuales se hicieron los respectivos análisis geotécnicos.

El primer perfil ubicado en la calle 34 con la carrera 107. El segundo polígono se ubica entre la calle 33B y el camino que corresponde a la prolongación de la calle 33A, entre la carrera 106 y el costado noroccidente de la placa polideportiva.

Perfil 1. Ubicado en la calle 33 B con carrera 106 a lo largo de la placa polideportiva Betania.

En el sector de estudio se definió el perfil geológico con base en la descripción detallada de las muestras recuperadas en las perforaciones 1 y 2, y en los resultados de los ensayos de laboratorio (Figura 42).

En la perforación 1 se encontró desde superficie lleno de mala calidad clasificado como arcillas de alta plasticidad CH hasta una profundidad de 16 metros, debajo del lleno saprolito del Stock de Altavista de textura arenosa, además fragmentos de granodiorita.

En la perforación 2 lleno de mala calidad desde superficie hasta 8 metros clasificado en laboratorio como arenas arcillosas, debajo del lleno y hasta una profundidad de 15 metros saprolito del Stock de Altavista clasificado como arenas arcillosas SC.

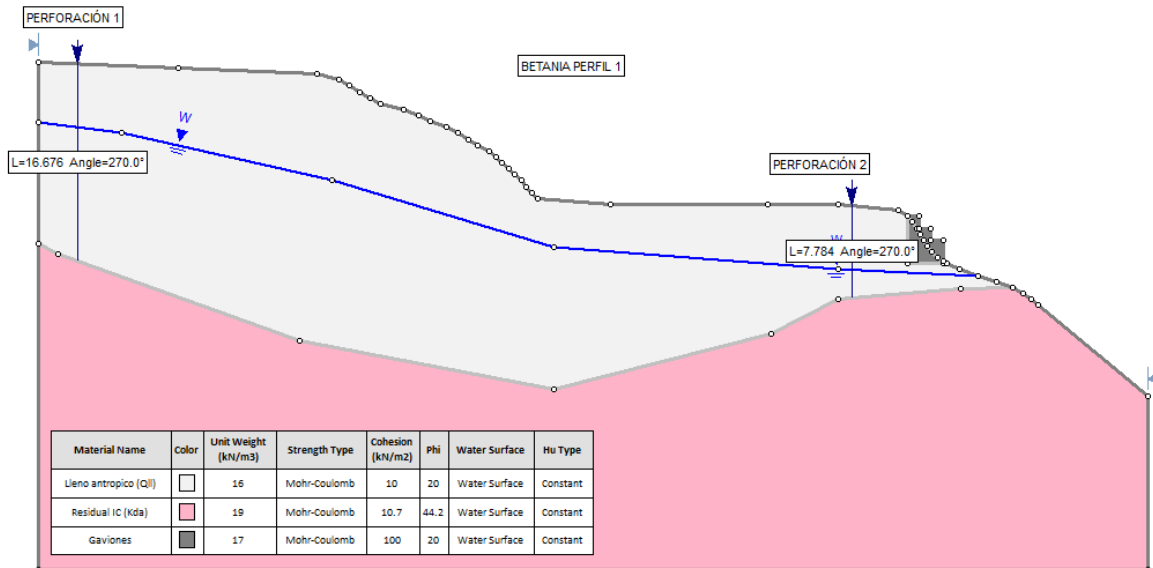


Figura 42. Modelo geológico- geotécnico perfil 1 Betania

Perfil 2. Ubicado en la calle 34 con la carrera 107. El perfil 2 se definió con las perforaciones 3 y 4. En la perforación 3 desde superficie se encontró un lleno de mala calidad hasta los 2 metros, desde los 2 metros y hasta 16 metros saprolito 1C del Stock de Altavista clasificado como CL. En la perforación 4 lleno de mala calidad desde superficie hasta los 3 metros, desde los 3 metros y hasta 15 metros Transición suelo roca clasificado como 2A de acuerdo a la clasificación de Deere y Patton (Figura 43)

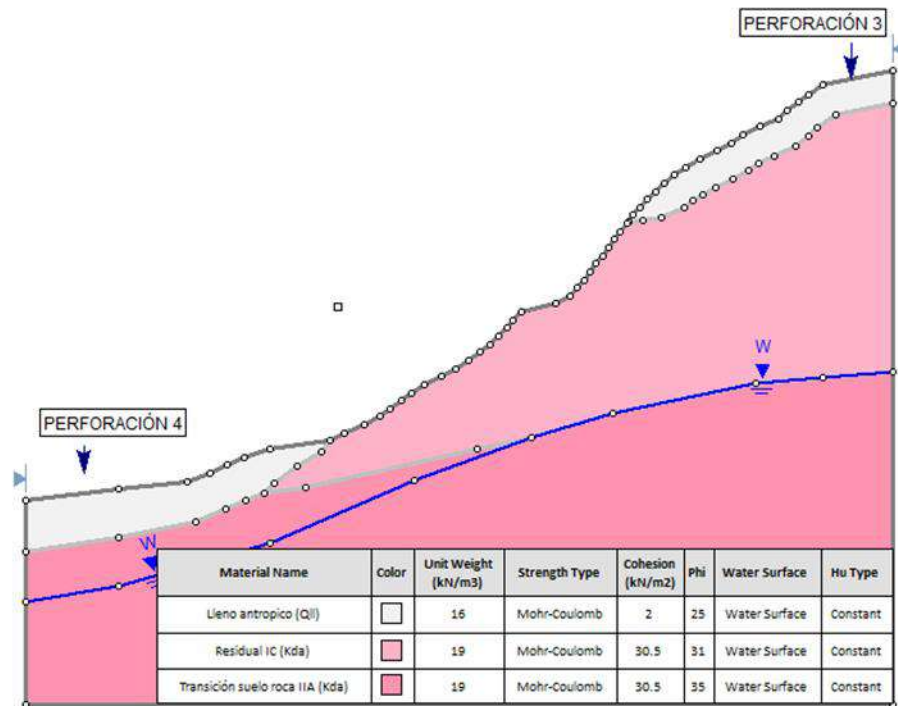


Figura 43. Modelo geológico-geotécnico perfil 2 Betania

7.3.3 Análisis de estabilidad condición actual

Para evaluar la estabilidad de la zona de estudio se consideraron 2 diferentes escenarios o condiciones: Una situación actual y una situación futura con las obras propuestas. Estas situaciones fueron consideradas tanto en condiciones estáticas como pseudo-estáticas. El análisis con las obras propuestas o situación futura o proyectada se presentará en un numeral posterior, una vez se haya definido la evaluación de la amenaza por movimientos en masa.

Para el análisis de estabilidad se utilizó el software Slide v 6.0 que se fundamenta en la teoría del equilibrio límite, el cual calcula por diferentes métodos (Morgenstern and Price, Janbu, Bishop etc) los factores de seguridad más críticos para diferentes superficies de falla en el talud. Para este caso se consideró de acuerdo con observaciones de campo, tipo de material, condiciones topográficas, que la falla más probable corresponde a fallas circulares.

Como se mencionó anteriormente, para el polígono Betania se levantaron dos (2) perfiles topográficos típicos que representaban las condiciones morfométricas del sector, en los cuales se plasmó la información estratigráfica y geotécnica.

El valor límite para el factor de seguridad en el caso estático y seudoestático fue tomado de las recomendaciones de la Norma de construcciones sismoresistentes (NSR-10) (Tabla 19).

Tabla 19. Factores de seguridad para el análisis de estabilidad (Tomado de Tabla H.2.4-1. NSR-10 Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos)

Condición	FSBM		FSBUM	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Carga Muerta + Carga Viva Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	1.25	1.10	1.40	1.15
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo-estático	1.10	1.00 (*)	No se permite	No se permite
Taludes – Condición Estática y Agua Subterránea Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Taludes – Condición Seudo-estática con Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de Diseño	1.05	1.00 (*)	No se permite	No se permite

(*) Nota: Los parámetros sísmicos seudo estáticos de Construcción serán el 50% de los de Diseño

Para el análisis seudoestático se utilizarán las recomendaciones establecidas en la NSR-10 numeral H.5.2.5 Sismo de control de daños, en donde se especifica que el coeficiente sísmico de diseño para análisis seudoestáticos de taludes (KST) deberá estimarse en función de la aceleración máxima del terreno (a_{max}) y ésta a su vez se calcula en función de la aceleración pico efectiva (a_a), del factor de amplificación F_a y del coeficiente de importancia (I) como:

$$a_{max} = a_a * F_a * I$$

Para el caso de la zona 10 donde se ubica el Polígono Betania, el estudio de microzonificación sísmica del área urbana de Medellín estableció un valor de A_a 0.07 para sismos de servicio y F_a como 3.57 (Tabla 20). Considerando el tipo de edificaciones (grupo III) el coeficiente de importancia es 1.0.

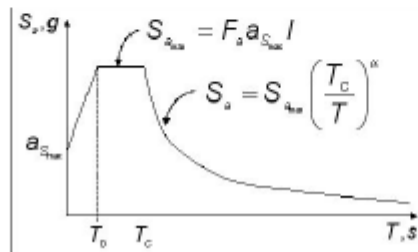
Si se reemplazan estos valores en la ecuación anterior se tiene que:

$$a_{max} = 0.25g$$

Tabla 20 Coeficientes sísmicos para las diferentes zonas homogéneas.

COEFICIENTES ESPECTRALES PARA LOS SISMOS DE CONTROL DE DAÑOS Y DE DISEÑO

Zona Homogénea	Sismo de control de daños						Sismo de diseño					
	a_{smax}	F_a	S_{amax}/I	T_0	T_c	α	a_{smax}	F_a	S_{amax}/I	T_0	T_c	α
1	0.05	4.50	0.23	0.10	0.50	1.43	0.27	2.60	0.70	0.10	0.60	1.34
2	0.08	2.80	0.22	0.10	0.30	1.17	0.34	2.35	0.80	0.10	0.40	1.17
3	0.07	3.57	0.25	0.10	0.50	1.48	0.30	2.66	0.80	0.20	0.70	1.52
4	0.05	3.60	0.18	0.10	0.60	1.46	0.23	2.17	0.50	0.10	0.65	1.22
5	0.06	3.66	0.22	0.10	0.50	1.42	0.20	3.00	0.60	0.10	0.60	1.26
6	0.05	2.81	0.14	0.10	0.40	1.11	0.20	2.50	0.50	0.10	0.50	1.07
7	0.06	3.66	0.22	0.10	0.50	1.42	0.20	3.00	0.60	0.10	0.60	1.26
8	0.08	2.25	0.18	0.10	0.65	1.52	0.23	2.40	0.55	0.10	0.75	1.37
9	0.06	3.75	0.23	0.10	0.40	1.31	0.26	2.70	0.70	0.10	0.55	1.28
10	0.09	2.78	0.25	0.10	0.40	1.35	0.38	2.10	0.80	0.10	0.50	1.29
11	0.06	3.75	0.23	0.10	0.50	1.43	0.26	2.88	0.75	0.10	0.65	1.43
12	0.06	4.16	0.25	0.10	0.65	1.67	0.26	3.07	0.80	0.15	0.70	1.52
13	0.06	4.16	0.25	0.10	0.40	1.35	0.26	3.07	0.80	0.10	0.50	1.29
14	0.05	2.81	0.14	0.10	0.50	1.23	0.20	3.00	0.60	0.10	0.55	1.21



El coeficiente sísmico de diseño para análisis seudoestático de taludes KST tiene valor inferior o igual al de a_{max} y se admiten los siguientes valores mínimos de KST/ a_{max} , dependiendo del tipo de material térreo (reforzado o no) y del tipo de análisis.

Tabla 21. Valores de KST/ a_{max}

Tabla H.5.2-1
Valores de K_{ST}/a_{max} Mínimos para Análisis Seudoestático de Taludes

Material	K_{ST}/a_{max} Mínimo	Análisis de Amplificación Mínimo
Suelos, enrocados y macizos rocosos muy fracturados (RQD < 50%)	0.80	Ninguno
Macizos rocosos (RQD > 50%)	1.00	Ninguno
Todos los materiales térreos	0.67	Amplificación de onda unidimensional en dos columnas y promediar
Todos los materiales térreos	0.50	Amplificación de onda bidimensional

Para el caso de suelos, enrocados y macizos rocosos muy fracturados se tiene una relación $KST/a_{max} = 0.80$, entonces El coeficiente sísmico de diseño para análisis seudoestático (KST) = 0.20

El perfil de suelo identificado para la zona de estudio, con base en la (Tabla A.2.4.1 – NSR10), es un perfil tipo D, correspondiente a suelos rígidos que presentan una velocidad de onda de corte V_s entre 180 m/s y 360 m/s, y un número de golpes $50 > N \geq 15$.

Para definir amenaza por estabilidad, el valor límite para el factor de seguridad en el caso estático se toma de acuerdo a lo planteado en el Decreto 1626 de 2015, en el cual se define que para valores inferiores a 1.2 (o $PF > 0.05/\text{año}$) el nivel de amenaza es alto, valores entre 1.2 y 1.5 (PF entre 0.002 y 0.05/año) se clasifican con nivel de amenaza media y factores de seguridad > 1.5 ($PF < 0.002$) se definen con nivel de amenaza bajo.

Para el caso estático se determina la condición de amenaza de acuerdo al factor de seguridad obtenido, para los casos seudoestático y saturado se tomarán como valores de referencia los correspondientes a la probabilidad de falla.

La probabilidad de falla presentada en los diferentes análisis realizados es un valor adimensional y corresponde a la probabilidad de que ocurra una falla en el talud, dado que se está presentando un escenario específico, por ejemplo, en el caso seudoestático la probabilidad de falla presentada corresponde a la probabilidad de falla dado que en ese momento se está presentando el sismo definido, sin embargo, para obtener la probabilidad real debe considerarse también la probabilidad que el sismo realmente ocurra.

La lluvia y el sismo son los factores detonantes considerados dentro de los escenarios planteados y estos factores se encuentran asociados a un periodo de retorno determinado, por lo tanto, la probabilidad de ocurrencia de cualquier evento viene definido por $1/Tr$, donde Tr es el periodo de retorno del factor detonante con unidades 1/año; al realizar el producto de esta probabilidad de ocurrencia por la probabilidad de falla presentada en cada modelo se obtendrá la probabilidad final para cada escenario analizado, (la cual responde a la probabilidad de que ocurra X dado que ocurrió Y), por ejemplo, la probabilidad de que se dé un deslizamiento dado que se está presentando el sismo (que es finalmente el factor detonante).

Teniendo en cuenta lo expresado anteriormente, y considerando que el periodo de retorno del sismo incorporado en los análisis es de 475 años ($PF=0.0021/\text{año}$) se

calculan las probabilidades de falla para este escenario y se presentan en cada perfil de manera detallada, lo cual se presenta de manera similar para el escenario saturado donde el periodo de retorno es de 25.1 años (PF=0.04/año).

Perfil 1

El primer escenario evaluado correspondió a la situación actual que considera la situación de estabilidad en las condiciones encontradas durante el estudio. Para la condición actual estática el factor de seguridad determinístico es 1.10, el factor de seguridad medio es 1.11 con una profundidad del cirulo de falla de 3 metros y velocidad del movimiento alto (Figura 44).

Para la condición seudo-estática el factor de seguridad determinístico es de 0.76 y el medio es de 0.77 con probabilidad de falla del 99.7% (Figura 45).

De acuerdo con lo anterior la amenaza en condición estática es alta. La amenaza en condición seudo-estática es media PF=0.002.

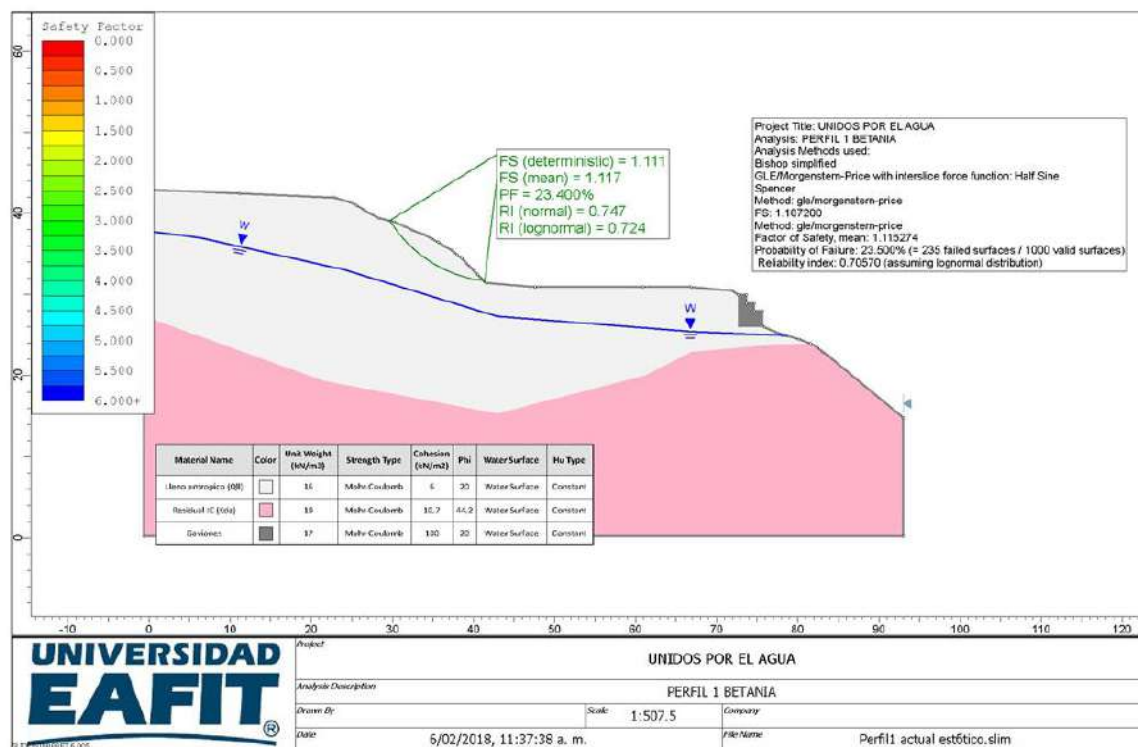


Figura 44. Análisis de estabilidad perfil 1 condición actual.

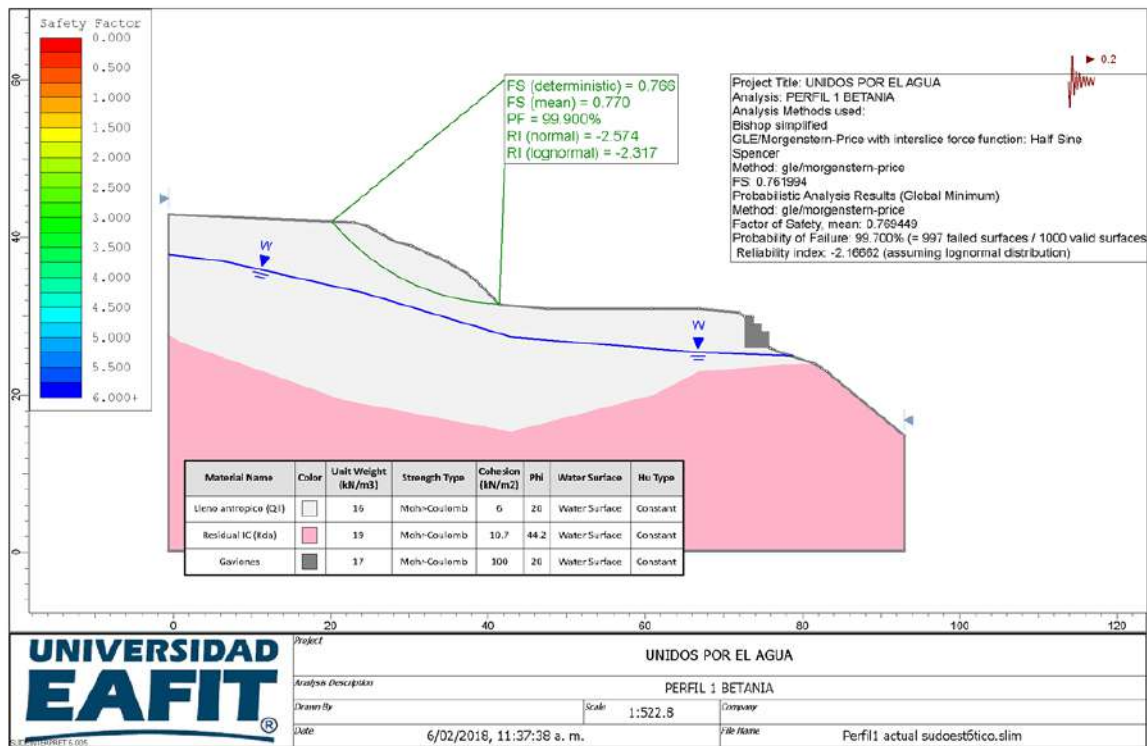


Figura 45. Análisis estabilidad perfil 1 condición actual pseudo-estática.

Finalmente, para el perfil No 1 se realizó el análisis de estabilidad para una condición hipotética en donde se simuló la saturación de los materiales que componen el perfil sin considerar la influencia del sismo. Un factor de seguridad determinístico de 0.82, medio de 0.83, con una probabilidad de falla de 95%.

De acuerdo con lo anterior la amenaza en condición saturada es media $PF=0.038$ (Figura 46).

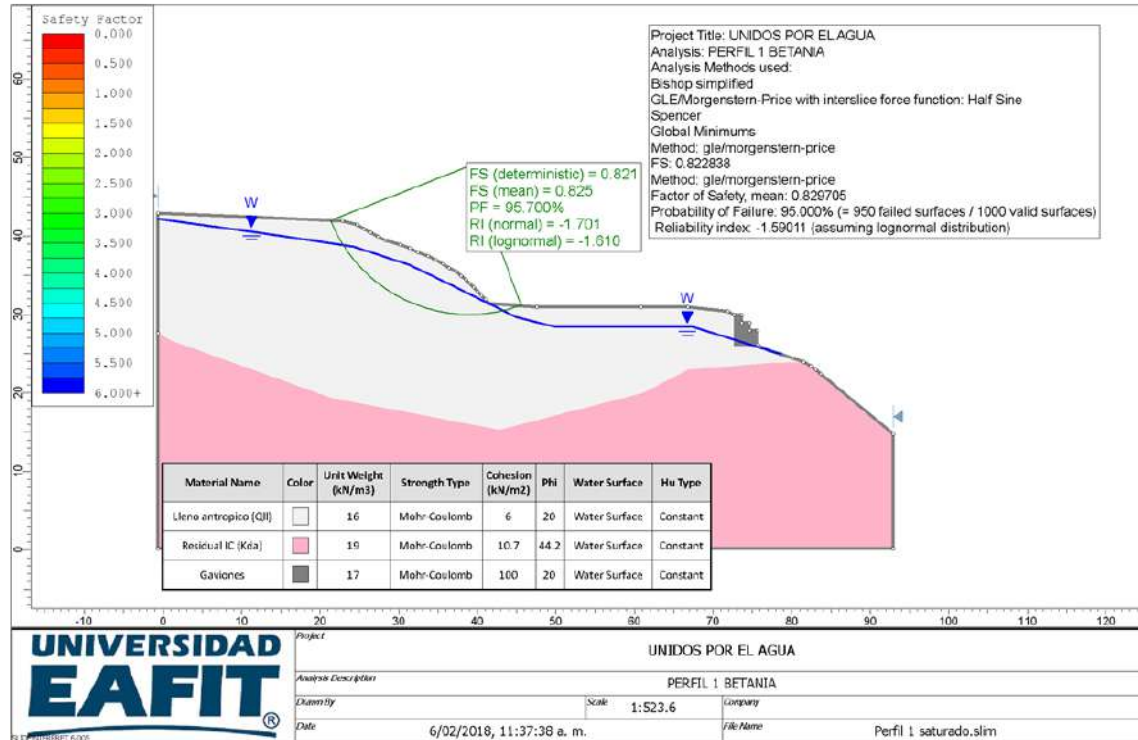


Figura 46. Análisis estabilidad perfil 1 condición actual saturada.

Perfil 2

El análisis de estabilidad para el perfil No 2 para la condición actual arrojó un factor de seguridad determinístico y medio de 1.0 con una probabilidad de falla de 48%, que muestra la susceptibilidad a generar movimientos en masa (Figura 47).

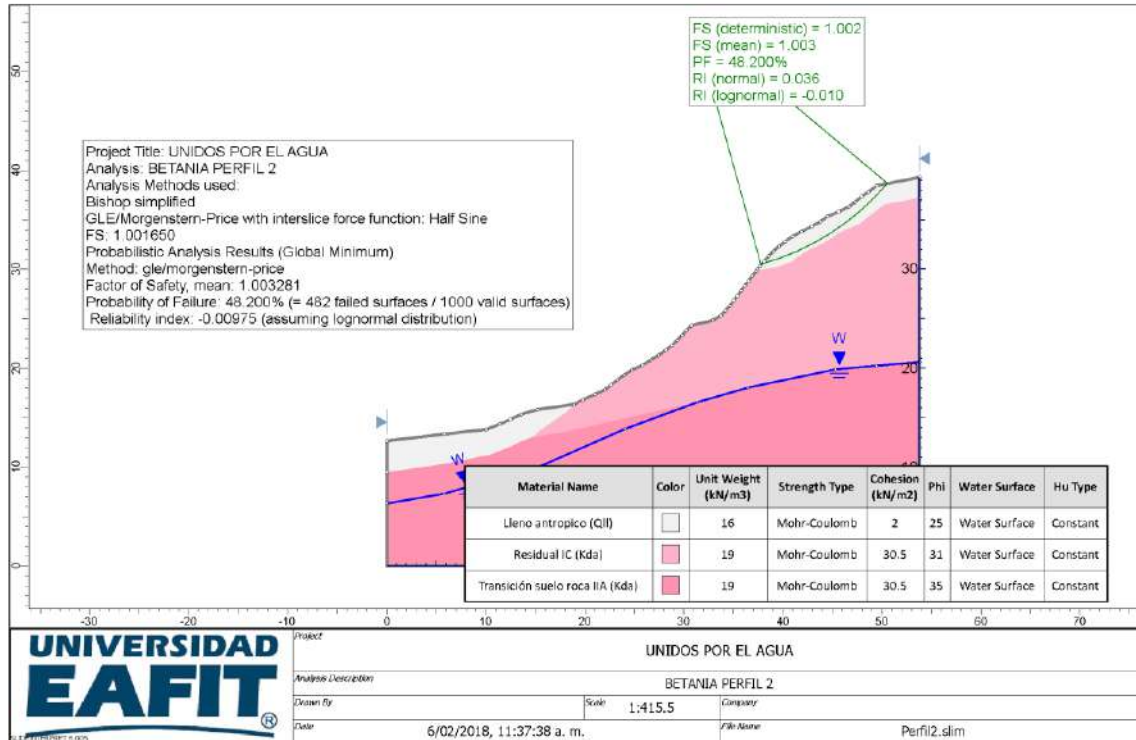


Figura 47. Análisis estabilidad Perfil 2 situación actual, condición estática.

El análisis seudoestático para la condición actual arrojó un factor de seguridad determinístico de 0.67 y medio de 0.68 con una probabilidad de falla del 100% (Figura 48).

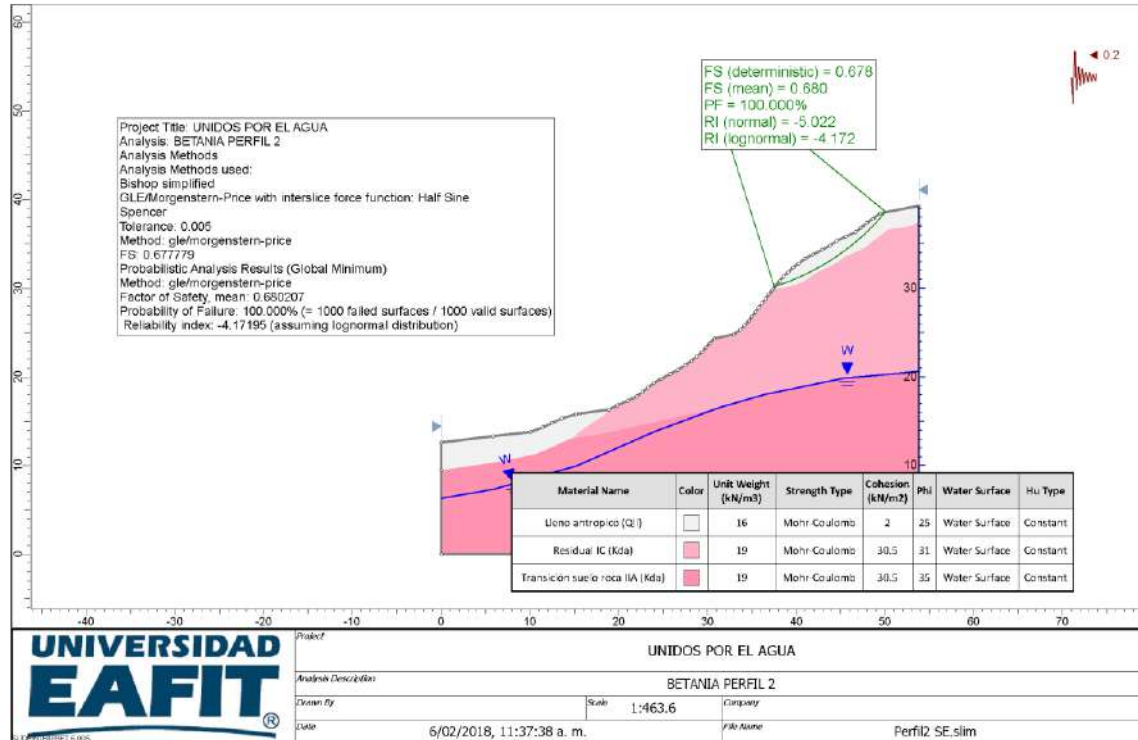


Figura 48. Análisis estabilidad perfil 2 condición pseudo-estática.

Los resultados anteriores permiten clasificar la amenaza por movimientos en masa como alta, según decreto 1626 de 2015, pues los factores de seguridad determinísticos se ubican por debajo de 1.2. La profundidad de falla se estima en 2m aproximadamente y se espera un movimiento de velocidad alta. Para la condición pseudo-estática la amenaza se clasifica como media (PF=0.021 entre 0.002 y 0.05/año)

Se analizó la estabilidad del perfil No 2 para una condición extrema que considera la saturación del perfil, para lo cual se graficó la línea del nivel freático cerca de la superficie. Bajo este supuesto se obtuvo un factor de seguridad medio de 1.0 con una probabilidad de falla de 48%, La amenaza se clasifica como baja PF=0.019 entre 0.002 y 0.05/año) (Figura 49).

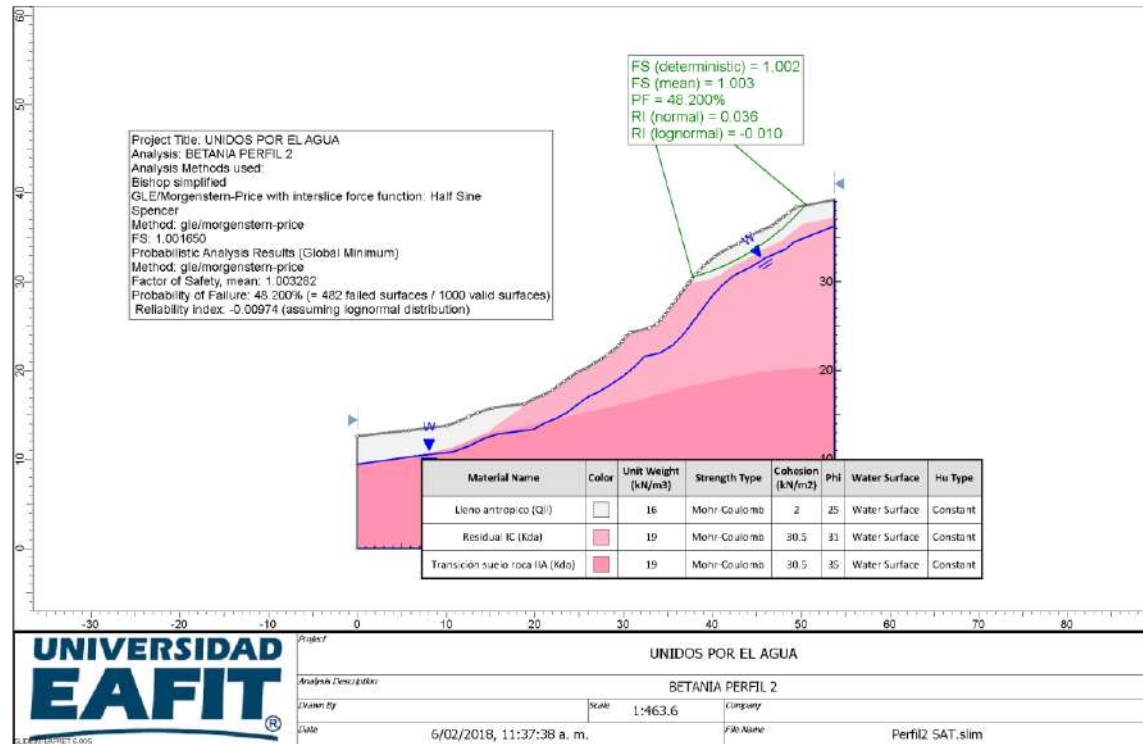


Figura 49. Análisis estabilidad perfil 2 condición saturada.

8. ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

8.1 MODELO HIDROGEOLÓGICO REGIONAL

Considerando las características geológicas de una región, el primer elemento a analizar, en la búsqueda de potenciales unidades almacenadoras de agua subterránea, son las condiciones texturales y estructurales de las unidades litológicas de la zona de estudio. Se plantean aquí unas premisas en términos de la expectativa que, a nivel descriptivo, generarían las condiciones de porosidad y permeabilidad primaria (textura) o secundaria (estructuras y meteorización) (AMVA, 2013)

De lo expuesto en el capítulo correspondiente a Geología se retoma aquí las condiciones que, además de la composición y origen, determinan características texturales de los materiales de la corteza terrestre, dentro del dominio espacial del Valle de Aburrá; aquí radica el sentido de incluir dentro de la descripción geológica un minucioso nivel de detalle en términos de mineralogía, afectación estructural y meteorización de saprolitos. De acuerdo con esto, en la Tabla 22 se sintetiza una interpretación que da lugar a una primera aproximación acerca de las potenciales bondades hidrogeológicas en la zona de estudio; dentro de las rocas ígneas se considera que las características adquiridas a través de procesos de fracturamiento y meteorización en el Stocks de Altavista, esta unidad debe ser objeto de un análisis más detallado para evaluar la probabilidad de constituir posibles acuíferos o zonas de recarga. Dentro de las rocas metamórficas se encontraron condiciones de posible interés desde el punto de vista de la recarga a las Metabasitas del Picacho y respecto a los depósitos del Cuaternario, todos son considerados en principio como posibles reservorios de agua subterránea (modificado de AMVA, 2013).

Tabla 22. Unidades hidrogeológicas en la zona de estudio (Modificado de AMVA, 2013)

Tipo de roca	Unidad geológica	Asignatura	Características texturales	Características estructurales	Diagnostico hidrogeológico
Ígneas	Stock de Altavista	(KdA)	Roca compacta, Saprolito varia de limo arcilloso a limo arenoso	Se encuentra diaclasado	Probable potencial hidrogeológico
Metamórficas	Metabasitas del Picacho	(JKmbP)	Saprolito limoso	Se encuentran diaclasadas	Probable potencial hidrogeológico
Depósitos	Depósitos Aluviales	(Qal)	Matriz areno limosa	Sin Reportar	Buen potencial hidrogeológico

Tipo de roca	Unidad geológica	Asignatura	Características texturales	Características estructurales	Diagnostico hidrogeológico
	Depósitos Aluviotorrenciales	(Qat)	Matriz areno gravosa	No reportadas	Buen potencial hidrogeológico
	Depósitos de flujos de escombros y/o lodos	(QFa)	Bloques en matriz que varía de arena fina a arcillosa	Sin Reportar	Buen potencial hidrogeológico
		(QFIII)			
		(QFIV)			
		(NQFII)			
		(NFI)			
		(NFprel)			

Según el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2013, en el Valle de Aburrá existen tres unidades hidrogeológicas de interés acuífero (Figura 50), y se designan como:

- i) **Acuífero Libre del Valle de Aburrá:** Conformado por los depósitos aluviales del río Aburrá - Medellín y sus afluentes, y los depósitos de vertiente, categorizados como flujos de lodo y escombros con edades del Neógeno o el Cuaternario. Texturalmente estos depósitos están constituidos por gravas, arenas y cantos en matriz areno-arcillosa gradando a arcillosa hacia la base, con presencia de lentes de grava y arcilla. Esta unidad se ubica en el área de estudio, hacia las inmediaciones de la quebrada Ana Díaz, con influencia en el polígono 1213-1.
- ii) **Acuífero semiconfinado del Valle de Aburrá:** Conformado por depósitos de origen aluvial, separados del acuífero libre por una capa sellante de carácter arcilloso. El acuífero semiconfinado estaría localizado regionalmente al noreste del polígono de estudio, sobre la cuenca baja de la quebrada El Salado y La Hueso, está conformado por gravas, arenas y cantos en matriz arcillo-arenosa con pequeños lentes de arena o arcilla; aún no se tiene suficiente información para modelar con certeza la geometría de esta unidad.

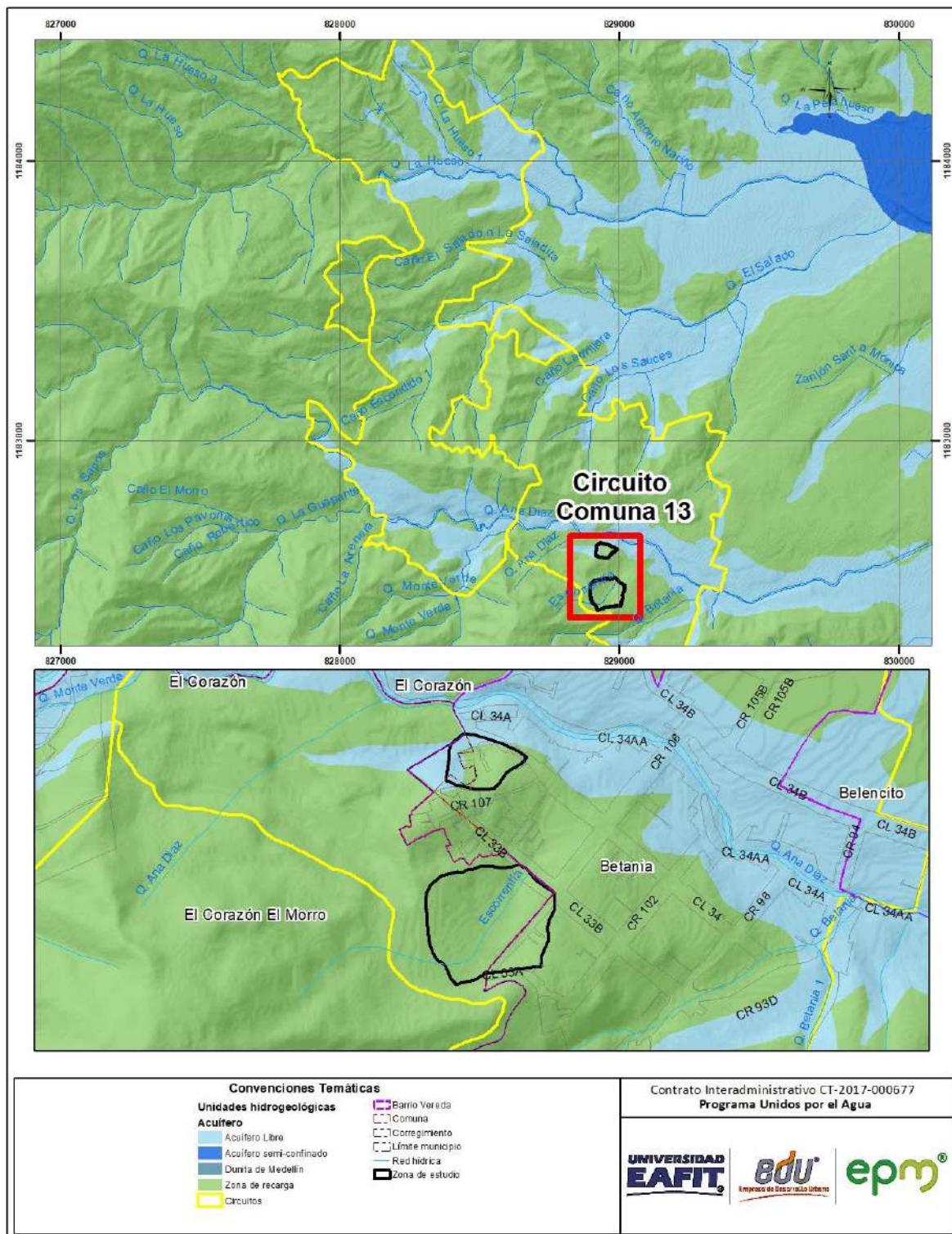


Figura 50. Unidades hidrogeológicas para el Valle de Aburrá, modificado de AMVA 2013.

Los factores que condicionan la recarga de un sistema acuífero son la distribución espacial de las unidades hidrogeológicas, las características geomorfológicas que posee el paisaje, los rasgos estructurales de las rocas que rodean a los acuíferos, el tipo de cobertura, la hidrografía, las características hidráulicas de los suelos y las condiciones hidrometeorológicas (AMVA, 2013).

De acuerdo con la conceptualización general al respecto, algunos factores antrópicos pueden constituir también fuentes de recarga, estos son: los retornos por riego, las fugas en redes de acueducto y alcantarillado, y la recarga artificial (AMVA, 2013).

Para la determinación de las potenciales áreas de recarga en el valle de Aburrá se tiene como hipótesis la existencia de tres posibles fuentes de recarga: I) una recarga distribuida en las superficies libres donde afloran las unidades acuíferas, II) la interacción hidráulica que existe con los principales cuerpos de agua superficial, como lo son el río Aburrá-Medellín y sus principales afluentes, y III) la recarga proveniente de los aportes de flujos regionales, a partir de las rocas encajantes que presentan permeabilidad secundaria (AMVA, 2013).

La dirección del flujo subterráneo proviene desde las zonas de recarga hacia el río, siguiendo en términos generales el sentido de la pendiente; es evidente el papel del río Aburrá-Medellín como frontera hidráulica que capta el flujo base. Llama la atención el sector ubicado en inmediaciones de La Aguacatala hasta el Cerro Nutibara, el cual coincide con un tramo en el que el río cambia su curso y describe una curva cóncava hacia el oeste, allí las líneas de flujo subterráneo que tienen su origen en la vertiente oriental del valle, trascienden el cauce superficial para luego confluir con las líneas de flujo que provienen del occidente, en un sector alineado subparalelamente al río. Esta situación podría ser un indicio de la existencia de paleocauces o de intervenciones antrópicas (AMVA 2013).

8.2 PERMEABILIDAD

Entendiendo la permeabilidad como la capacidad de un suelo para permitir el paso de un fluido (en términos particulares, el agua) sin que dicho tránsito altere la estructura interna del suelo, se valoró de manera general la permeabilidad de los suelos superficiales que conforman el polígono Betania. Para lo anterior, se tuvo en cuenta las clasificaciones granulométricas de los materiales obtenidos en los ensayos de laboratorio y se compararon con valores de la literatura establecidos por diferentes autores, en este caso específico se utilizó como referencia la información

que se muestra en la Tabla 23 extractada de Mecánica de suelos en la ingeniería práctica de Terzaghi y Peck (1980).

Tabla 23. Valores relativos de permeabilidad. (Fuente: Terzaghi K y Peck R, 1980)

Permeabilidad relativa	Valores de K (cm/seg)	Suelo típico
Muy permeable	$> 1 * 10^{-1}$	Grava gruesa
Moderadamente permeable	$1 * 10^{-1}$ a $1 * 10^{-3}$	Arena, arena fina
Poco permeable	$1 * 10^{-3}$ a $1 * 10^{-5}$	Arena limosa, arena sucia
Muy poco permeable	$1 * 10^{-5}$ a $1 * 10^{-7}$	Limo y arenisca fina
Impermeable	$< 1 * 10^{-7}$	Arcilla

Revisado el mapa de formaciones superficiales, se observa que existe un predominio de materiales residuales derivados de rocas ígneas plutónicas del Stock de Altavista (horizonte IB y saprolito IC) caracterizado por presentar arenas arcillosas SC, arenas limosas SM y arcillas de baja plasticidad CL con predominio de arenas. Según la tabla anterior tendrían valores de permeabilidad (K) entre 1×10^{-3} y 1×10^{-5} clasificándolos como suelos poco permeables, por lo que es de esperarse que exista un predominio de la infiltración.

La otra unidad superficial que aflora y que se encuentra en gran parte del sector corresponde a materiales de lleno, los cuales poseen granulometrías heterogéneas con materiales clasificados desde CL-CH y SC (arcillas de baja y alta plasticidad, arenas arcillosas), donde se pueden esperar valores de permeabilidad que oscilen entre 1×10^{-3} hasta 1×10^{-7} , es decir materiales poco permeables a impermeables.

8.3 EVALUACION DE DRENAJE SUPERFICIAL

Los drenajes de aguas superficiales observados en el polígono de estudio están directamente relacionadas a la presencia de obras de conducción de aguas de escorrentía (cunetas), existencia de redes de alcantarillado y soluciones individuales de vivienda. En el polígono de estudio estas redes se encuentran a lo largo de las calles 33B y calle 34A y sobre la carrera 106, donde se presentan cunetas que movilizan las aguas hacia los colectores, dichas estructuras en muchos casos no tienen la capacidad para evacuar las aguas asociadas a lluvias intensas, complementario a esto, se suma los malos manejos de los desechos y las basuras del área que obstaculizan el flujo de agua en estas estructuras. Las aguas de escorrentía corren principalmente hacia la quebrada Ana Díaz al norte del polígono.

8.4 CALCULO DEL PERIODO DE RETORNO DE ACUERDO A LOS MOVIMIENTOS EN MASA

Para el análisis de las lluvias, necesario para el estimativo de lluvia detonante de los movimientos en masa, se realizó un análisis teniendo como punto de partida los eventos históricos recientes, como fueron las fuertes lluvias asociadas al fenómeno de la Niña, entre los meses de Junio de 2010 a mayo de 2011 (NOAA, n.d.).

Como información base para el análisis se contó con el registro diario de precipitación de las estaciones presentadas en la Tabla 24.

Tabla 24. Estaciones de precipitación usadas para el análisis de lluvia detonante.

Código	Estación	Este	Norte	Entidad	Zona
27011110	Astilleros	823095,3	1183926,0	IDEAM	Occidental
27011120	La Iguaá	825125,7	1190448,8	IDEAM	Occidental

Adicionalmente, para la verificación de las Intensidades de lluvia presentes en las zonas de interés, se contó con las curvas Intensidad – Frecuencia – Duración (IDF) desarrolladas por Empresas Públicas de Medellín a partir de registros históricos (Tabla 25).

Tabla 25. Estaciones de precipitación con curvas IDF.

Código	Estación	Este	Norte
2701507	Olaya Herrera	832940	1180055
2701036	Caldas	828568	1160480
2701035	Chorrillos	842280	1188220
2308028	El Chuscal	847420	1161540
2701037	Fabricato	831500	1195470
2308021	La Fe	843500	1166060
2308023	Las Palmas	838550	1172290
2701034	Mazo	841940	1184200
2701047	Miguel de Aguinaga	834980	1184470

Código	Estación	Este	Norte
2701045	Villa Hermosa	837340	1183990
2701093	La Ayurá	835380	1173830
2308027	Macarena	859185	1172724
2701053	San Andrés	849230	1203540
2701038	San Antonio de Prado	824660	1175940
2701046	San Cristóbal	827560	1186550
2308024	Vasconia	844895	1178000

Para el análisis de lluvias en cada una de las Unidades Morfodinámicas independientes (UMI) se parte del supuesto que la precipitación se presenta de forma uniforme sobre toda el área de la cuenca. Este se evidencia a menudo al interior del valle de Aburrá.

Para asociar la intensidad de lluvia inicialmente se verificó dentro de los registros de precipitación disponibles para los años 2010 y 2011, cuales son los valores mayores, además del mes de ocurrencia. Una vez conocidos estos valores, se usó la hidrología sobre los cauces principales de las quebradas, para determinar el tiempo de concentración, hasta un punto a la altura de polígono de intervención.

Después de determinar el tiempo de concentración, se verificó con las curvas IDF propiedad de EPM las intensidades de lluvia y precipitaciones asociadas a cada periodo de retorno. De esta forma, se interpoló para encontrar el periodo de retorno al cual se encuentra asociado cada precipitación de los registros disponibles (Tabla 26).

Tabla 26. Periodos de retorno asociados a las lluvias máximas diarias de los años 2010 y 2011.

Polígono	Estación IDF	Año	Mes	Tr	Cuenca
Betania	San Cristóbal	2011	Mayo	25.1	Q. La Hueso
El Salado	San Cristóbal	2011	Mayo	25.1	Q. La Hueso
Las Independencias	San Cristóbal	2011	Mayo	25.1	Q. La Hueso
Nuevos Conquistadores	San Cristóbal	2011	Mayo	25.1	Q. La Hueso

9. ZONIFICACIÓN DE AMENAZA

Para el polígono de Betania la zonificación de amenazas incluye la relacionada como movimientos en masa, debido a que según el Acuerdo 48 de 2014 la zona analizada se clasifica únicamente como de condición de riesgo por movimientos en masa.

9.1 AMENAZAS POR MOVIMIENTOS EN MASA

A continuación, se presentan la zonificación de amenazas por movimientos en masa llevada a cabo a partir de la combinación de los análisis de estabilidad y los contornos obtenidos por el runout.

Una vez se obtienen los resultados de los análisis de estabilidad, estos se extrapolaron a todo el polígono utilizando criterios geomorfológicos, buscando integrar áreas con las mismas características presentes en los perfiles de estabilidad, para lo cual se utilizó el criterio experto del geólogo y geotecnista. Se descartó la utilización de metodologías de superposición de mapas, puesto que en estudios anteriores los técnicos de Planeación Municipal consideraron este tipo de mapas, menos precisos.

9.1.1 Amenaza por estabilidad

Para la zonificación de amenazas por movimientos en masa se utilizó el método determinístico, el cual corresponde a un análisis cuantitativo en el que se calcula el factor de seguridad de cada ladera. Para la aplicación específica del método se elaboran modelos de análisis de estabilidad de taludes con base en la información de detalle obtenida a partir de la información de campo y de la exploración del subsuelo, y se calculan los factores de seguridad al deslizamiento. Estos modelos requieren de información específica sobre estratificación, estructura, propiedades de resistencia de los materiales, ángulo de fricción interno, y modelos de simulación de niveles freáticos.

Para el análisis de amenaza por estabilidad, el valor límite para el factor de seguridad en el caso estático se toma de acuerdo a lo planteado en el Decreto 1626 de 2015, en el cual se define que para valores inferiores a 1.2 (o $PF > 0.05/\text{año}$) el nivel de amenaza es alto, valores entre 1.2 y 1.5 (PF entre 0.002 y 0.05/año) se clasifican con nivel de amenaza media y factores de seguridad > 1.5 ($PF < 0.002$) se definen con nivel de amenaza bajo.

Para el caso estático se determina la condición de amenaza de acuerdo al factor de seguridad obtenido, para los casos pseudoestático y saturado se tomarán como valores de referencia los correspondientes a la probabilidad de falla.

La probabilidad de falla presentada en los diferentes análisis realizados es un valor adimensional y corresponde a la probabilidad de que ocurra una falla en el talud, dado que se está presentando un escenario específico, por ejemplo, en el caso pseudoestático la probabilidad de falla presentada corresponde a la probabilidad de falla dado que en ese momento se está presentando el sismo definido, sin embargo, para obtener la probabilidad real debe considerarse también la probabilidad que el sismo realmente ocurra.

La lluvia y el sismo son los factores detonantes considerados dentro de los escenarios planteados y estos factores se encuentran asociados a un periodo de retorno determinado, por lo tanto, la probabilidad de ocurrencia de cualquier evento viene definido por $1/Tr$, donde Tr es el periodo de retorno del factor detonante con unidades 1/año; al realizar el producto de esta probabilidad de ocurrencia por la probabilidad de falla presentada en cada modelo se obtendrá la probabilidad final para cada escenario analizado, (la cual responde a la probabilidad de que ocurra X dado que ocurrió Y), por ejemplo, la probabilidad de que se dé un deslizamiento dado que se está presentando el sismo (que es finalmente el factor detonante).

Teniendo en cuenta lo expresado anteriormente, y considerando que el periodo de retorno del sismo incorporado en los análisis es de 475 años ($PF=0.0021/año$) se calculan las probabilidades de falla para este escenario y se presentan en cada perfil de manera detallada, lo cual se presenta de manera similar para el escenario saturado donde el periodo de retorno es de 25.1 años.

9.1.1.1 Amenaza en condiciones actuales estáticas

Basado en la metodología anterior, y en los rangos definidos por el Decreto 1626 de 2015 se definieron las siguientes zonas de amenazas para el polígono Betania (Figura 51).

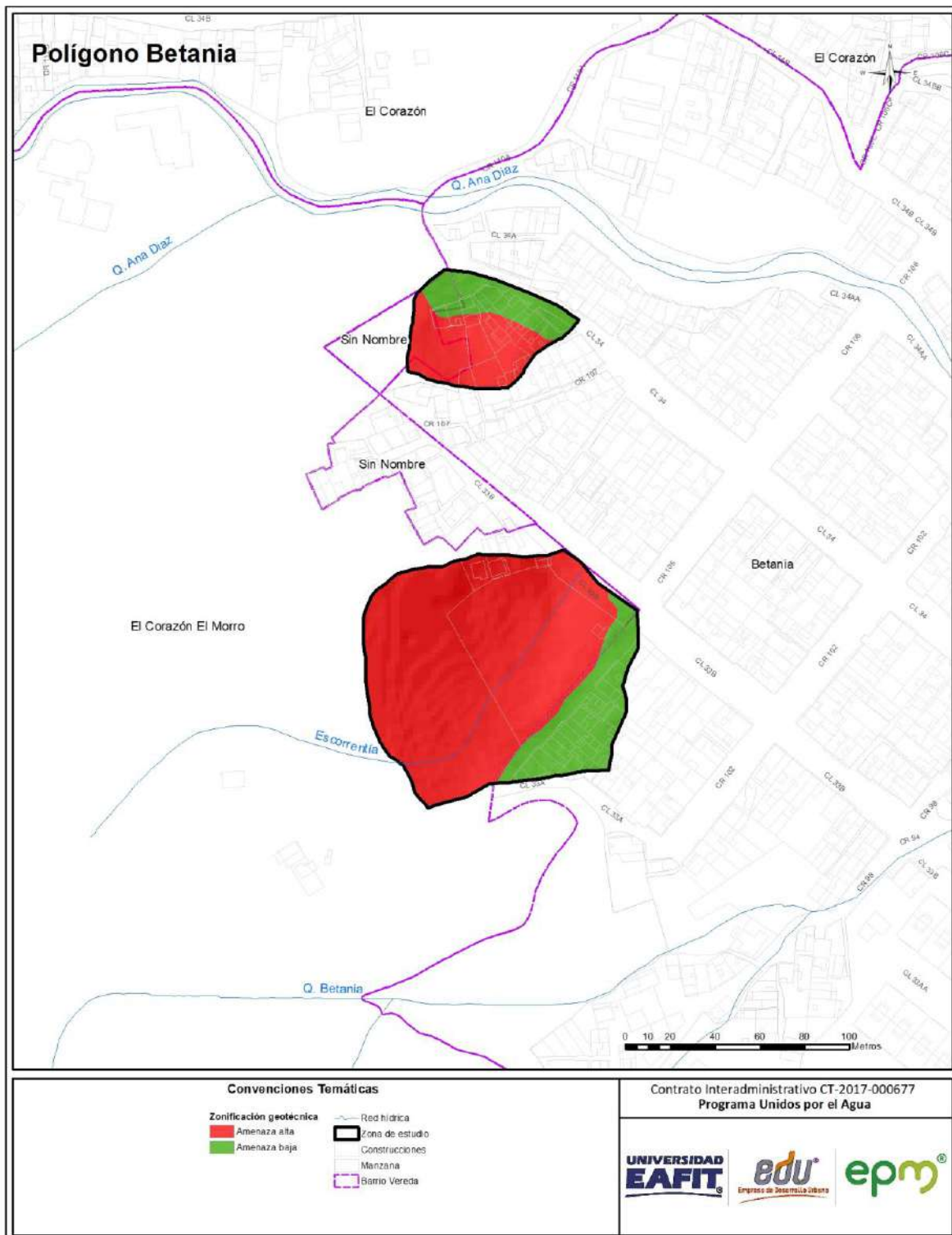


Figura 51. Mapa de amenaza por estabilidad del polígono de Betania.

Amenaza Alta: los análisis de estabilidad resultantes para el perfil 1 arroja factor de seguridad de 1.11 y para el perfil 2 un valor de factor de seguridad de 1.0 en condición estática y de acuerdo con estos resultados y a partir de la tabla de decisión propuesta por el Decreto 1626 de 2015, las zonas con factores de seguridad en los rangos inferiores a 1.2, se deben clasificar como zonas de amenaza alta.

Esta clasificación está ubicada en dos sectores, el primero corresponde al sector de la cancha polideportiva, asociada a las unidades ladera cóncava, corta y abrupta y ladera convexa, corta y suave, sobre la margen sur oriental del polígono 7003-1; geológicamente está relacionada a llenos antrópicos y al saprolito del stock de Altavista y pendientes muy abruptas; la segunda zona se ubica en la vertiente posterior de la línea de viviendas, localizadas sobre la calle 34, hacia el extremo nororiental del polígono (1312-1), geológicamente está caracterizada por saprolito del stock de Altavista y pendientes variables, que oscilan entre los rangos de suave a abruptas.

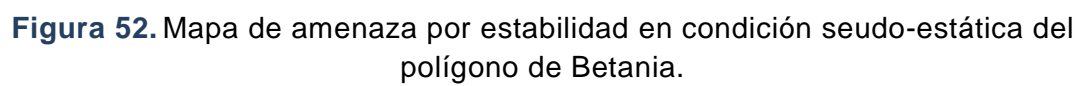
Asociado a esta zona de amenaza alta y los factores de seguridad mencionados anteriormente, los movimientos en esta zona se caracterizan como de velocidad alta con superficies de falla superficial de 3m y un factor de seguridad de 1.11 para el perfil 1 y superficie de falla de 2m y factor de seguridad de 1.00 perfil 2. Se destaca que este factor de seguridad indica una alta probabilidad de formación de inestabilidades asociadas al tipo de material detectado y a las altas pendientes del sector y no satisface los valores de factor de seguridad estipulados en los códigos para garantizar la estabilidad de la zona, por lo que se determina un nivel de amenaza alto.

Amenaza Baja: corresponde a una zona con baja probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa; en esta clasificación se encuentra en dos sectores, el primero localizado al norte del polígono 1312-1, y corresponde a una franja sobre la calle 34, este se caracteriza por presentar una pendiente inferior al 10% y geológicamente asociado a llenos de poco espesor sobre suelos residuales del stock de Altavista; el segundo sector se ubica en el polígono 7003-1, sobre la carrera 106 entre las calles 33A y 33B, geológicamente asociado al saprolito del stock de Altavista; esta zona se encuentra urbanizada sin evidencias de inestabilidad. Asociado a esta zona no se identifican movimientos en masa, sin embargo, asociado al manejo inadecuado de las aguas lluvias y de escorrentía se identifica la ocurrencia de procesos de tipo erosivo.

9.1.1.2 Amenaza en condiciones seudo – estáticas

El cálculo de la amenaza en condiciones seudo-estáticas se realizó a partir de los factores de seguridad obtenidos en los perfiles 1 y 2 bajo una condición de sismo, para los cuales se obtuvieron valores 0.76 y 0.67 respectivamente, y de acuerdo con estos resultados y a partir de la tabla de decisión propuesta por el Decreto 1626 de 2015, las zonas con factores de seguridad en los rangos inferiores a 1.2, se deben clasificar como zonas de amenaza alta.

Igualmente se realizó el cálculo de la amenaza en condiciones seudo-estáticas a partir de las probabilidades de falla obtenidos en los perfiles 1 y 2 bajo influencia del sismo, para los cuales se obtuvieron valores de 99.7 % y 100% respectivamente. Relacionando estos valores con el periodo de retorno incorporado en los análisis (475 años), se obtiene una probabilidad de falla de 0.002 para ambos perfiles, las cuales distribuidas en un periodo de retorno de 50 años corresponden a valores de 0.105 (perfil 1 y 2) por lo que se clasifica el polígono analizado como de amenaza media en condiciones seudo-estáticas por corresponder a una probabilidad localizada en el rango entre 0.002 y 0.5 (Figura 52). Se enfatiza que este resultado es menos crítico que el determinado con los factores de seguridad por lo que se descarta para el análisis y se trabaja con el escenario más crítico.



9.1.1.3 Amenaza en condiciones saturadas

El cálculo de la amenaza en condiciones saturadas se realizó a partir de los factores de seguridad obtenidos en los perfiles 1 y 2 bajo una condición de saturación de los materiales que componen el perfil de suelos, para los cuales se obtuvieron valores 0.82 y 1.0 respectivamente, y de acuerdo con estos resultados y a partir de la tabla de decisión propuesta por el Decreto 1626 de 2015, las zonas con factores de seguridad en los rangos inferiores a 1.2, se deben clasificar como zonas de amenaza alta (Figura 53).

Igualmente se realizó el cálculo de la amenaza en condiciones saturadas a partir de las probabilidades de falla obtenidos en los perfiles 1 y 2 bajo una condición de saturación de los materiales que componen el perfil de suelos, para los cuales se obtuvieron valores de 95% y 48% respectivamente. Relacionando estos valores con el periodo de retorno obtenido en los análisis hidrológicos de la zona (25.1 años), se obtiene probabilidades de falla de 0.038 para el perfil 1 y 0.019 para el perfil 2, por lo que, se clasifica todo el polígono en amenaza media. Se destaca que este resultado es menos crítico que el determinado con los factores de seguridad por lo que se descarta para el análisis y se trabaja con el escenario más crítico.

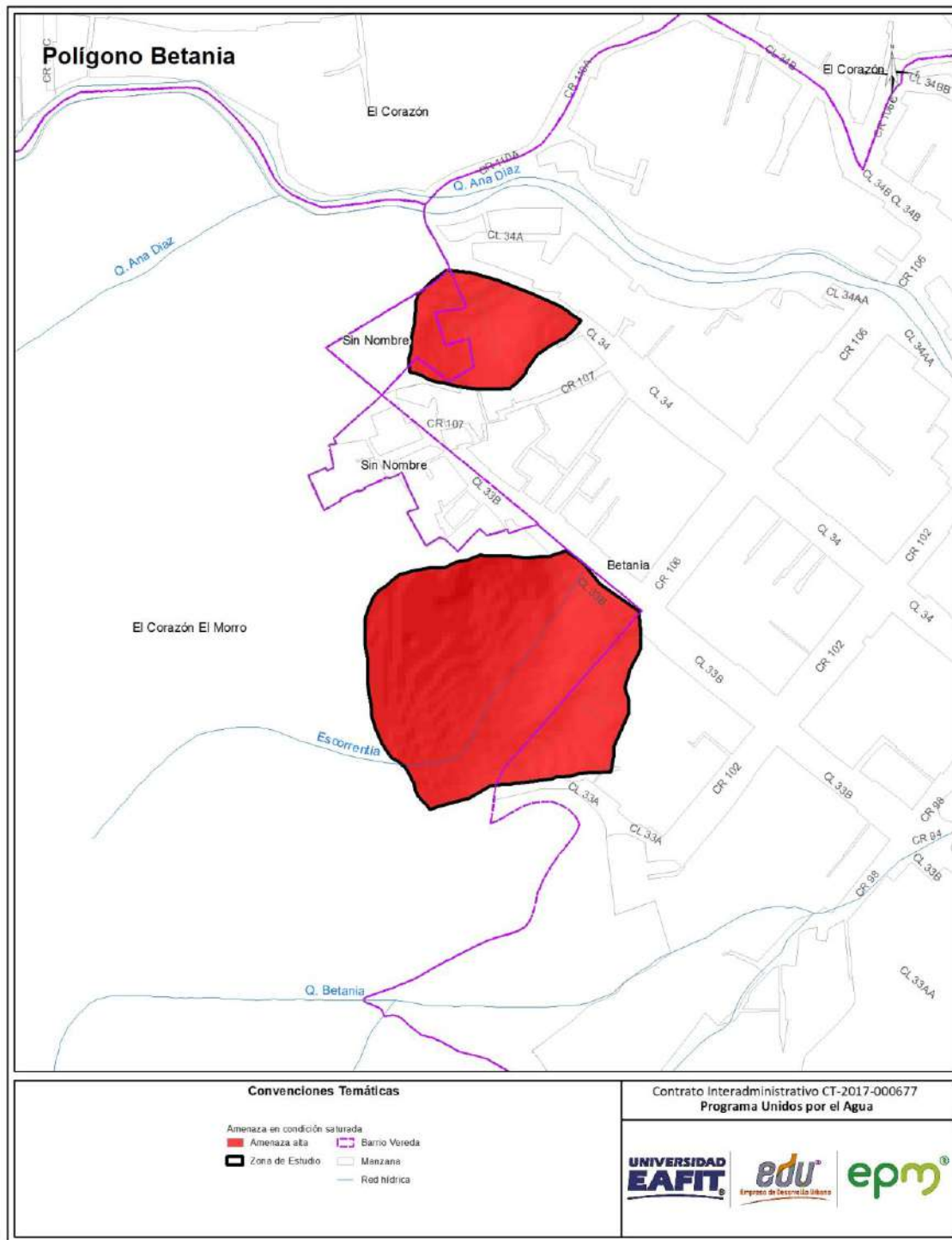
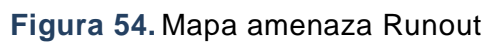


Figura 53. Mapa de amenaza por estabilidad en condición saturada del polígono de Betania.

9.1.2 Amenaza por Run-Out

Una vez calificada y analizada la amenaza por estabilidad, se ubicaron puntos a lo largo de la parte alta de la zona de falla, para poder conocer la altura desde la cual podría desprenderse el movimiento en masa, y por medio del modelo de elevación digital se obtuvieron los parámetros para poder conocer cuáles serían las distancias y el recorrido que podría tomar dicho deslizamiento. Con estas dos informaciones se realizó el modelamiento del RUNOUT (distancia de viaje) y se clasificó de manera conjunta con la amenaza por estabilidad. De acuerdo con la metodología aplicada (Guimarães, 2015), el contorno 0.4 representa una probabilidad del 90% de que hasta esta zona pueda desplazarse los materiales asociados a la ocurrencia de un movimiento en masa (Figura 54).



El Polígono Betania presenta amenaza por el Runout asociado principalmente a la pendiente y al material geológico de la zona, donde el material desplazado tendría afectación en un área por fuera del polígono 1312-1, como se muestra en la Figura 54, involucrando la zona de viviendas ubicadas sobre la calle 34 y el sector donde se ubica el ingreso a la cantera La Esmeralda, donde se presenta un importante cambio de pendiente que favorece los procesos de depositación y acumulación de materiales.

9.1.3 Amenaza total

La definición de la amenaza final resulta de la combinación de la amenaza obtenida mediante el método determinístico (análisis de estabilidad) y la distancia de viaje (runout), debido a que es necesario establecer tanto la zona donde hay probabilidad de que se generen los movimientos en masa, como su zona de influencia y depositación. Teniendo en cuenta lo anterior, el nivel de amenaza para una zona está condicionado tanto a la estabilidad propia del terreno en condiciones estáticas como a la probabilidad de que se vea afectada por la depositación de materiales asociados a movimientos en masa que se generen en la zona circundante. Se destaca que la valoración de la amenaza de las zonas afectadas por runout depende directamente del nivel de amenaza obtenido en la zona con probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa.

Teniendo en cuenta que, para el polígono de Betania, se determinaron zonas de amenaza por runout, la amenaza está condicionada a las características propias de estabilidad del terreno asociado a las condiciones topográficas y geomecánicas de los materiales que conforman el perfil de suelos, la cual a partir de los análisis de estabilidad obtenidos se determinan las siguientes categorías

Amenaza Alta: de acuerdo con el POT (2014) son áreas con una alta probabilidad de presentar movimientos en masa debido a que se encuentran afectadas por procesos geológicos activos e inactivos naturales y antrópicos, presentan pendientes muy abruptas a escarpadas y los suelos presentan altas restricciones para el establecimiento de intervenciones.

Esta categoría se localiza en dos sectores, el primero corresponde a la vertiente posterior de la línea de viviendas localizadas sobre la calle 34, hacia el extremo nororiental del polígono de estudio (1312-1). geológicamente está asociado saprolito del stock de Altavista. Esta área corresponde a la cicatriz de un antiguo deslizamiento, caracterizada por una ladera de forma cóncava, longitud entre 20 y

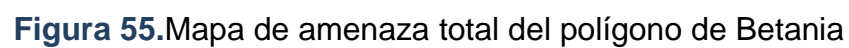
25m y pendientes en los rangos de 40-60% y mayores > 60%, con una alta probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa, presentando en un factor de seguridad de 1.001 en condiciones estáticas actuales; la masa desprendida puede llegar a depositarse hasta las inmediaciones de la calle 34, generando una ampliación por runout en la zona inicialmente analizada.

El segundo sector se ubica en el área de la placa polideportiva y parque infantil (7003-1), caracterizado geológicamente por llenos antrópicos y por el saprolito del Stock de Altavista (

Figura 55). Geomorfológicamente corresponde a ladera en lleno, cóncava, corta y muy inclinada, ladera en lleno, recta, corta y muy suave y ladera en lleno, recta, corta y abrupta; con una alta probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa, presentando en un factor de seguridad de 1.1 en condiciones estáticas actuales; la masa desprendida no supera la zona del polígono, delimitada por la calle 33B y carrera 106.

Amenaza baja: según el POT (2014) corresponden a áreas con aceptables condiciones de estabilidad, sin evidencias físicas o históricas de procesos morfodinámicos, o si existen, su densidad es baja, con baja probabilidad de que se presenten movimientos en masa o ser afectadas por el material desplazado, debido a la acción en conjunto de la lluvia acumulada y las pendientes.

Esta categoría de amenaza se única en dos sectores, el primero localizado al norte del polígono 1312-1, sobre la calle 34, el segundo se ubica en el polígono 7003-1, sobre la carrera 106 entre las calles 33A y 33B, donde predominan las pendientes muy bajas a muy inclinadas, sobre saprolito del Stock de Altavista (Figura 55).



El mapa de zonas homogéneas geotécnicas corresponde al mapa de estabilidad, dado que éste homogeniza las condiciones geotécnicas en los diferentes rangos de amenaza, los cuales son producto de los factores de seguridad obtenidos en cada uno de los perfiles analizados.

10. VULNERABILIDAD

A continuación, se presenta el análisis de la vulnerabilidad por movimientos en masa para el polígono de estudio. Inicialmente se analizará para las construcciones y posteriormente para las líneas vitales. Al final del capítulo se presentará la estimación para personas, la cual se basa en datos de información secundaria y en aproximaciones a partir de la vulnerabilidad de las construcciones.

En el polígono Betania se analizaron 51 construcciones, 25 postes de energía y 10 vías esta información proviene de la evaluación realizada en campo, de su estructuración y almacenamiento en una base de datos y su procesamiento posterior (Anexo 5).

10.1 ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS CONSTRUCCIONES POR MOVIMIENTO EN MASA

La vulnerabilidad de las construcciones consta de dos factores: la fragilidad y la intensidad. El primero de ellos corresponde a la respuesta del elemento expuesto ante determinada amenaza y depende de las características propias, mientras que la intensidad depende de las características del fenómeno amenazante (velocidad, volumen de la masa deslizante, profundidad, entre otras).

10.1.1 Cálculo de la fragilidad de las construcciones

Para la identificación de la fragilidad de las construcciones, se tuvo en cuenta la evaluación o análisis de los parámetros predominantes de las estructuras expuestas, los cuales son: tipología estructural, edad de la construcción, cantidad de niveles de la edificación y estado de conservación de la misma, todo esto de acuerdo a los parámetros y calificaciones definidos en el documento metodológico con la siguiente expresión (Anexo 1.)

$$S_e = 1 - \pi(1 - S_i)$$

$$S_e = 1 - (1 - S_{tip})(1 - S_{alt})(1 - S_{con})(1 - S_{ed})(1 - S_{Acueducto})(1 - S_{Alcantarillado})$$

Donde se consideran seis parámetros para la evaluación de la fragilidad de las edificaciones:

S_{tip} : Tipo de la edificación.

S_{alt} : Altura de la edificación.

S_{con} : Conservación de la edificación.

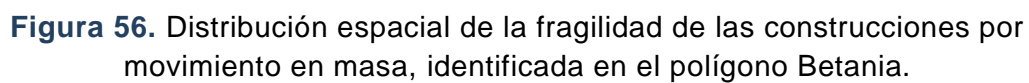
S_{ed} : Edad de la edificación.

$S_{Acueducto}$: Caracterización del sistema de acueducto de la edificación.

$S_{Alcantarillado}$: Caracterización del sistema del alcantarillado de la edificación.

De acuerdo con Figura 56, se puede concluir que el 100% de las construcciones analizadas en el polígono denominado Betania presentan fragilidades altas, referenciadas en un rango entre 0.7 y 1, con un valor representativo de 51 edificaciones, las cuales se encuentran localizadas, de manera general a lo largo de todo el polígono (Figura 57, Figura 58 y Figura 59).

.



La Figura 57 corresponde a una construcción que se clasifica como mampostería no reforzada dentro de la tipología E, la cual se caracteriza por poseer un sistema estructural de muros cargueros. Esta tipología representa el 82% de las construcciones del polígono.



Figura 57. Tipología estructuras ligeras (E). Construcción ubicada en el polígono Betania.

En la Figura 58 se puede visualizar una estructura que se clasifica como construcción improvisada dentro de la tipología F, la cual se caracteriza por no poseer una estructura definida y suele ser construida con materiales precarios o de recuperación, paneles de madera desgastados, metal, entre otros, estas estructuras no tienen un sistema de cimentación definido y usualmente se encuentran ubicadas en los puntos más altos o donde se presentan grandes cambios de pendiente. Esta tipología representa el 2% de las construcciones del polígono.

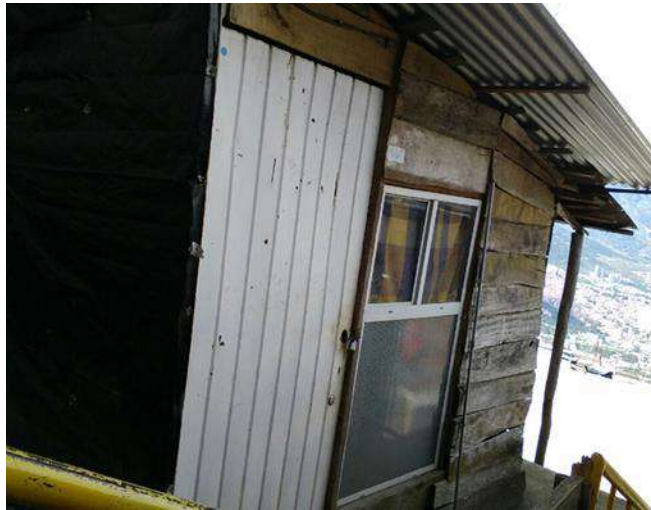


Figura 58. Tipología estructuras simples (F). Construcción ubicada en el polígono Betania.

En Figura 59 se muestra una estructura que tiene un valor de fragilidad intermedio asociado; la misma se puede clasificar como tipología D o estructuras con confinamiento deficiente e híbridas, ya que, si bien no cuentan con un confinamiento adecuado, tienen elementos estructurales que hacen que la edificación sea menos vulnerable, como columnas de sección menor y cimentaciones de zapatas. Esta tipología se encuentra representada en el 16% de las construcciones del polígono.



Figura 59. Tipología estructuras con confinamiento deficiente e híbridas (D).
Estructura ubicada en el polígono Betania.

10.1.2 Cálculo de la intensidad sobre las construcciones.

En la valoración de la intensidad de los eventos amenazantes se tienen en cuenta dos tipos de movimientos que producen deformación en el terreno, el movimiento lento y el movimiento rápido.

En el polígono de estudio se presentan los movimientos rápidos, definidos en un escenario de desplazamiento en etapa de falla, donde se calcula la intensidad, en función de la relación entre la presión de impacto del deslizamiento y la presión límite soportada por la edificación, además se debe tener en cuenta la relación existente entre la profundidad de la falla del deslizamiento y la altura de la edificación, descritos en el capítulo de Análisis Geotécnico.

En el polígono Betania se identifica una intensidad alta para todas las construcciones evaluadas; como se mencionó anteriormente dicha intensidad está en función de la profundidad y la presión de impacto (Figura 60).

Para estructuras de tipología ligeras (E), las cuales son el 82% del total de las construcciones evaluadas, la presión límite de la estructura es 5 Kpa, del mismo modo para una presión límite se presenta una velocidad límite, la cual indica que los movimientos de masa a esas velocidades provocarían el colapso total de las estructuras.

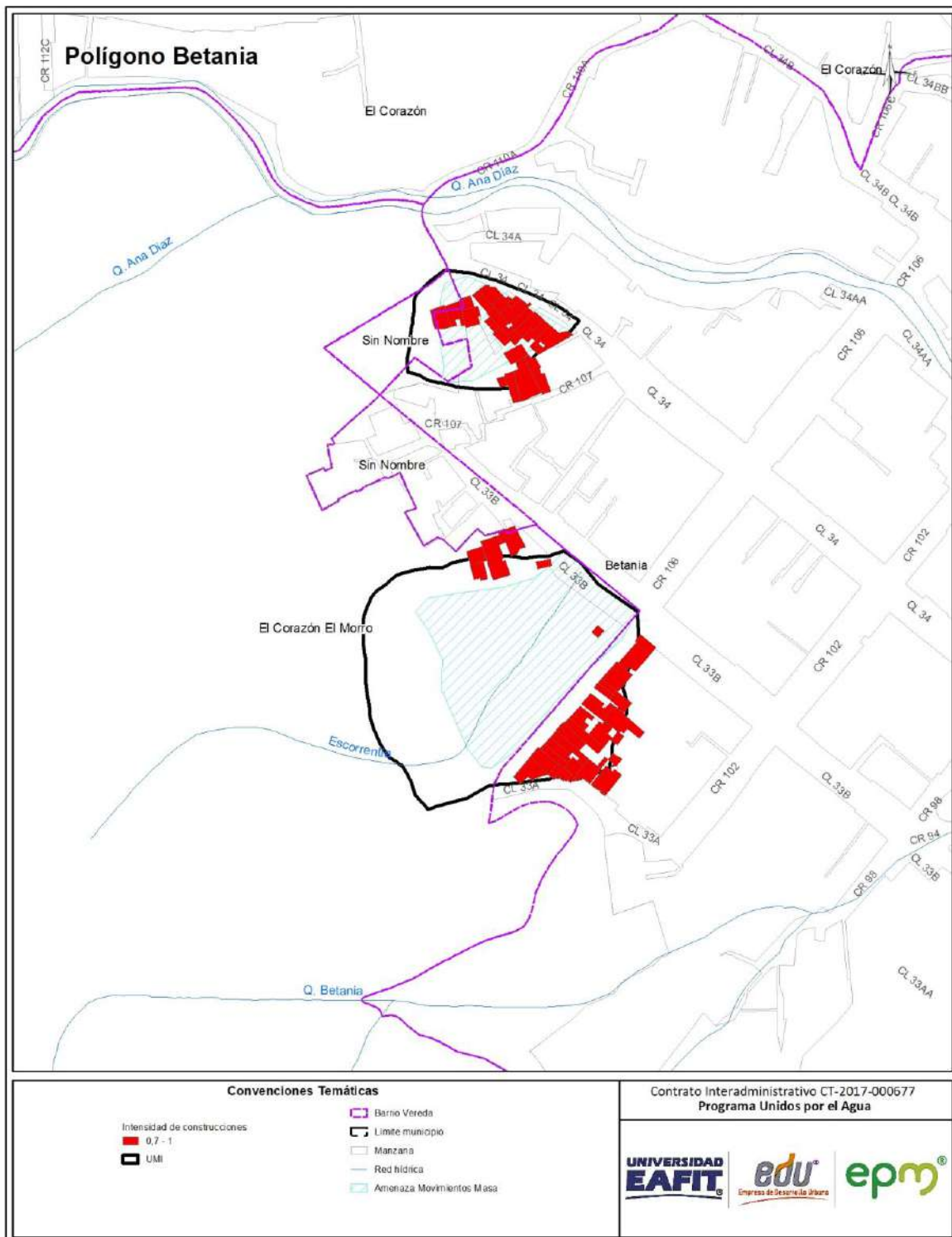


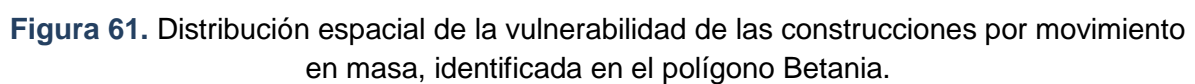
Figura 60. Distribución espacial de la intensidad de las construcciones por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.

10.1.3 Cálculo de la vulnerabilidad de las construcciones

El grado de vulnerabilidad de una edificación se define como el factor de exposición de la misma a percibir daños a causa de amenazas naturales, conforme a esta premisa la vulnerabilidad se calcula teniendo presente los resultados obtenidos de la fragilidad y de la intensidad a partir de los parámetros representados en los ítems analizados anteriormente.

Los valores de la vulnerabilidad se determinan en los siguientes rangos: vulnerabilidad baja, cuando se obtienen resultados menores o iguales a 0,1, vulnerabilidad media cuando se obtienen resultados entre 0,1 y 0,5, y vulnerabilidad alta, cuando los resultados sobrepasan de 0,5 todo esto de acuerdo a los parámetros y calificaciones definidos en el documento metodológico, más específicamente en el numeral 3.4. (Anexo 1.)

La vulnerabilidad alta corresponde al 100% de las edificaciones, las cuales se caracterizan por presentar valores altos de fragilidad y medios a altos de intensidad, las construcciones con esta vulnerabilidad se localizan a lo largo del polígono (Figura 61).



10.2 ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS LÍNEAS VITALES POR MOVIMIENTO EN MASA.

Similar al procedimiento, los parámetros y características que se utilizan para determinar la vulnerabilidad en construcciones, se deberá calcular la fragilidad conforme la información obtenida de campo y los criterios de medición en cada una de las denominadas líneas vitales (vías, energía, acueducto y alcantarillado, estos últimos dos cuando se identifican daños visibles en puntos específicos de la red) y luego se procede a realizar la evaluación de la intensidad.

Como se mencionó anteriormente en el polígono Betania se analizaron 25 postes de energía y 11 vías, que corresponden al componente de líneas vitales (Anexo 5).

10.2.1 Cálculo de la fragilidad de la línea vital – energía

La fragilidad de la línea vital energía se mide teniendo en cuenta los parámetros de carga y estado de las redes localizadas en la zona de estudio del polígono denominado Betania.

En el polígono estudiado se encontraron 25 postes, de los cuales 6 de ellos están en mal estado, es decir, agrietados y/o fisurados, los cuales en su gran mayoría son de madera y por ende su carga mínima de rotura es 0 (KgF), lo que hace que tengan una fragilidad de 1; estos postes se encuentran localizados en el norte, el centro y oriente, entre las calles 33B y 33A del polígono (Figura 62).

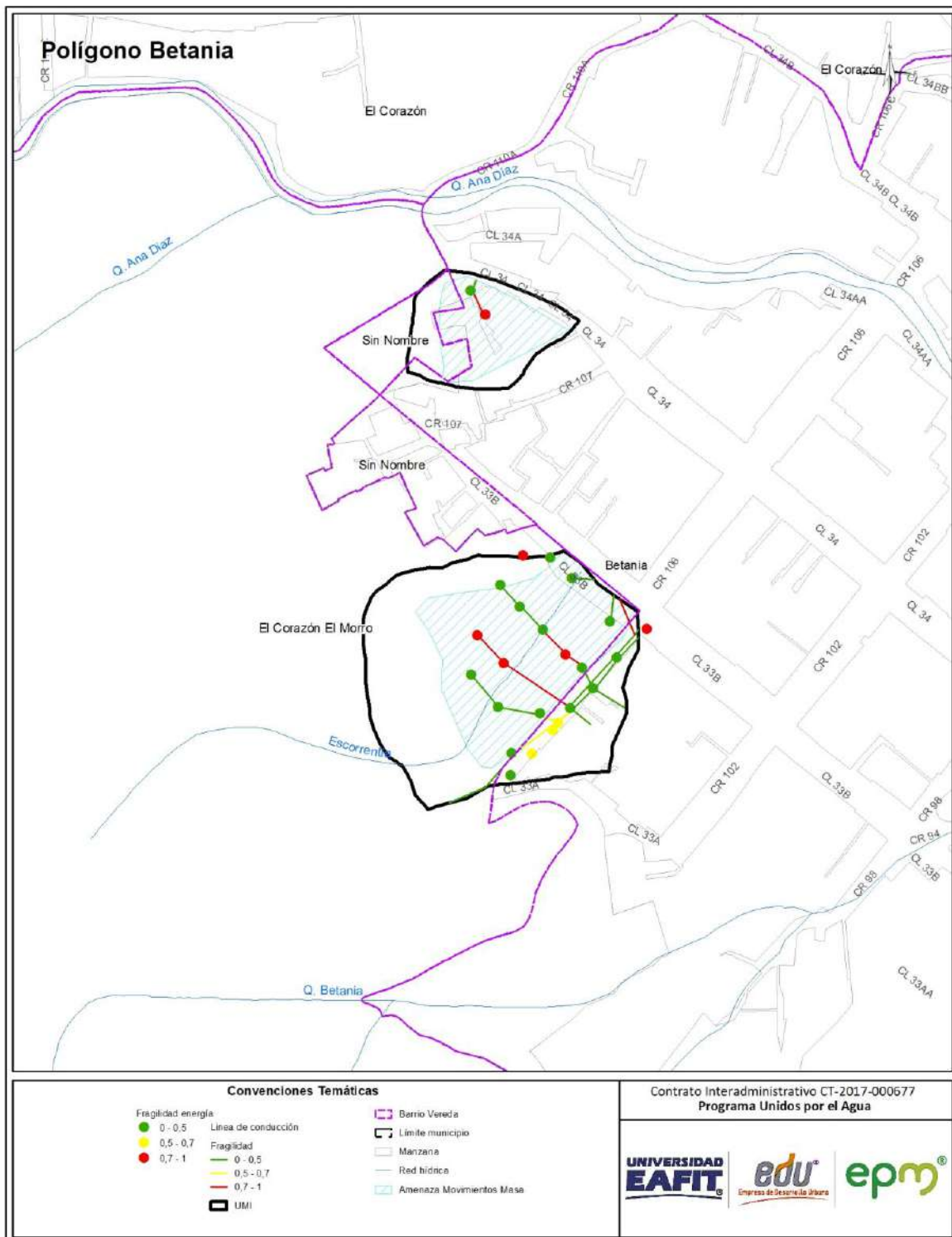


Figura 62. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital energía por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.

10.2.2 Cálculo de la intensidad de la línea vital – energía

Para la determinación de la intensidad en movimientos rápidos, como es el caso del polígono estudiado, el parámetro de intensidad en función de la presión de tierras crítica, se expresa como la relación entre la altura del deslizamiento y la altura nominal del poste (Anexo 1).

La intensidad alta de las líneas vitales energía en el polígono Betania está representada con el 92% y corresponde a 23 postes localizados en el oriente del polígono. Dicho resultado se debe a la relación que hay entre la altura del deslizamiento y la altura nominal de los postes, lo que indica que para los elementos que se encuentran dentro de la zona de viaje del deslizamiento, el mecanismo de impacto puede ser enterramiento e impacto. Adicionalmente en el norte del polígono se identifican 2 postes con intensidad media, representados porcentualmente con el 8% de la red de energía evaluada (Figura 63).

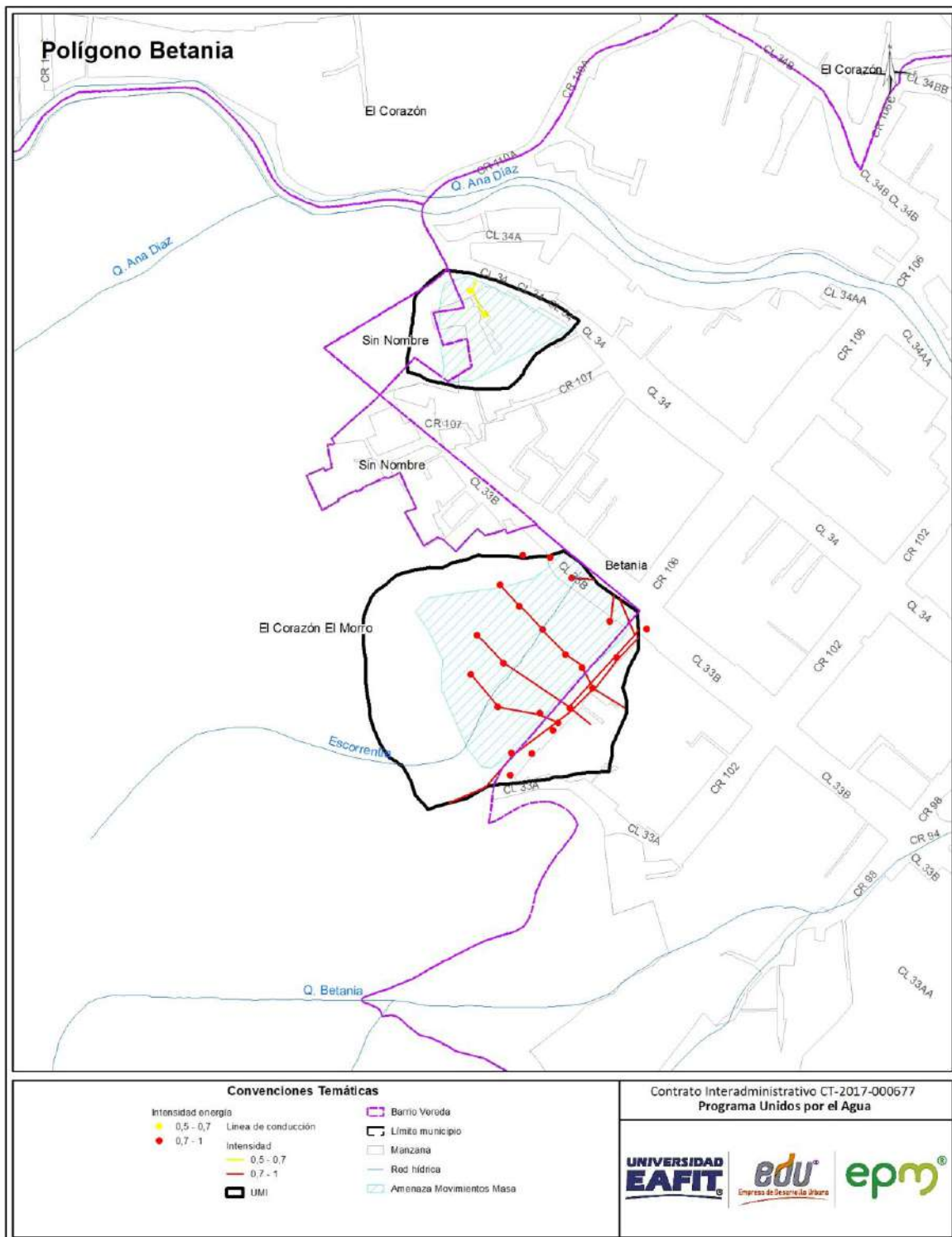


Figura 63. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital energía por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.

10.2.3 Cálculo de la vulnerabilidad de la línea vital – energía

La vulnerabilidad alta corresponde al 36% de los postes de energía evaluados, los cuales se caracterizan por presentar valores altos de fragilidad y medios a altos de intensidad, los postes con esta vulnerabilidad se localizan en el norte, en el centro y sur del polígono (Figura 64).

La vulnerabilidad media corresponde al 64% de los postes de energía evaluados, los cuales se caracterizan por presentar valores medios a bajos de fragilidad y medios a altos de intensidad, los postes con esta vulnerabilidad se localizan en el norte y en el oriente del polígono.

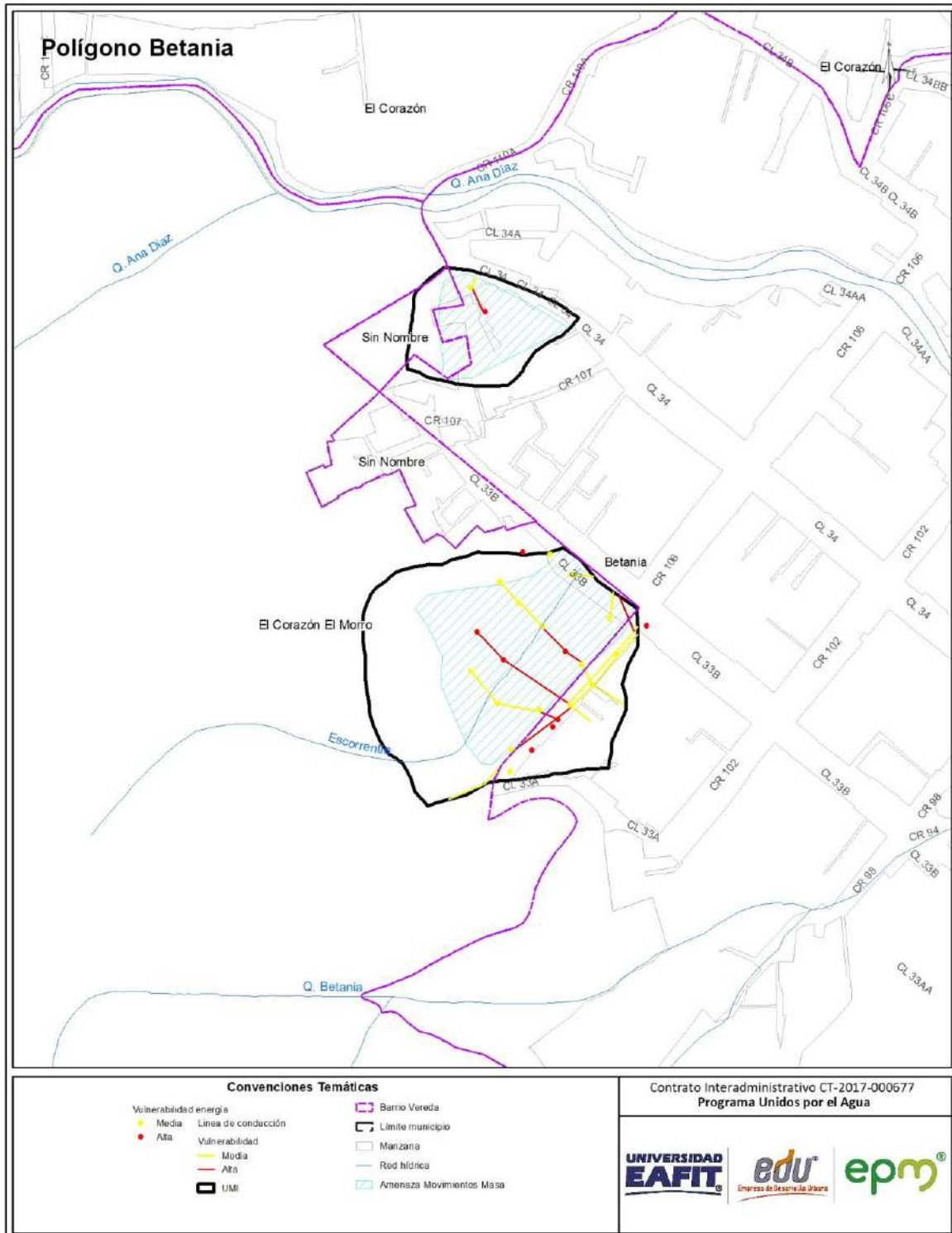


Figura 64. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital energía por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.

10.2.4 Cálculo de la fragilidad de la línea vital – vías

Para la valoración de la fragilidad de las vías, se consideran los parámetros de material o tipo, existencia de obras de drenaje y presencia de daños. La tipología de estas vías puede ser: vehicular, puente vehicular o peatonal, sendero peatonal a nivel y a desnivel (con escaleras).

Las vías de acceso del polígono que están representadas con color amarillo son vías con fragilidad media, que presentan daños como baches, fisuras entre otras que comprometen el ancho útil de la misma, tienen valores de fragilidad entre 0,5 y 0,7 y están representados por el 20%, se encuentran ubicadas en la zona nororiental del polígono. Adicionalmente la falta de obras de drenaje hace que aumente la fragilidad de los accesos viales ya que la gran mayoría de las vías internas del polígono corresponden a vías locales como andenes de circulación, conformados por pavimento rígido a nivel y desnivel; en el polígono de estudio con un valor porcentual del 80%, se identificaron tramos de vías con valoración entre 0,7 – 1 que representa una fragilidad alta y se encuentran ubicadas en la parte norte y corresponde a la calle 34 y en el suroriente, identificadas en algunos tramos de la carrera 106 en la zona evaluada (Figura 65).

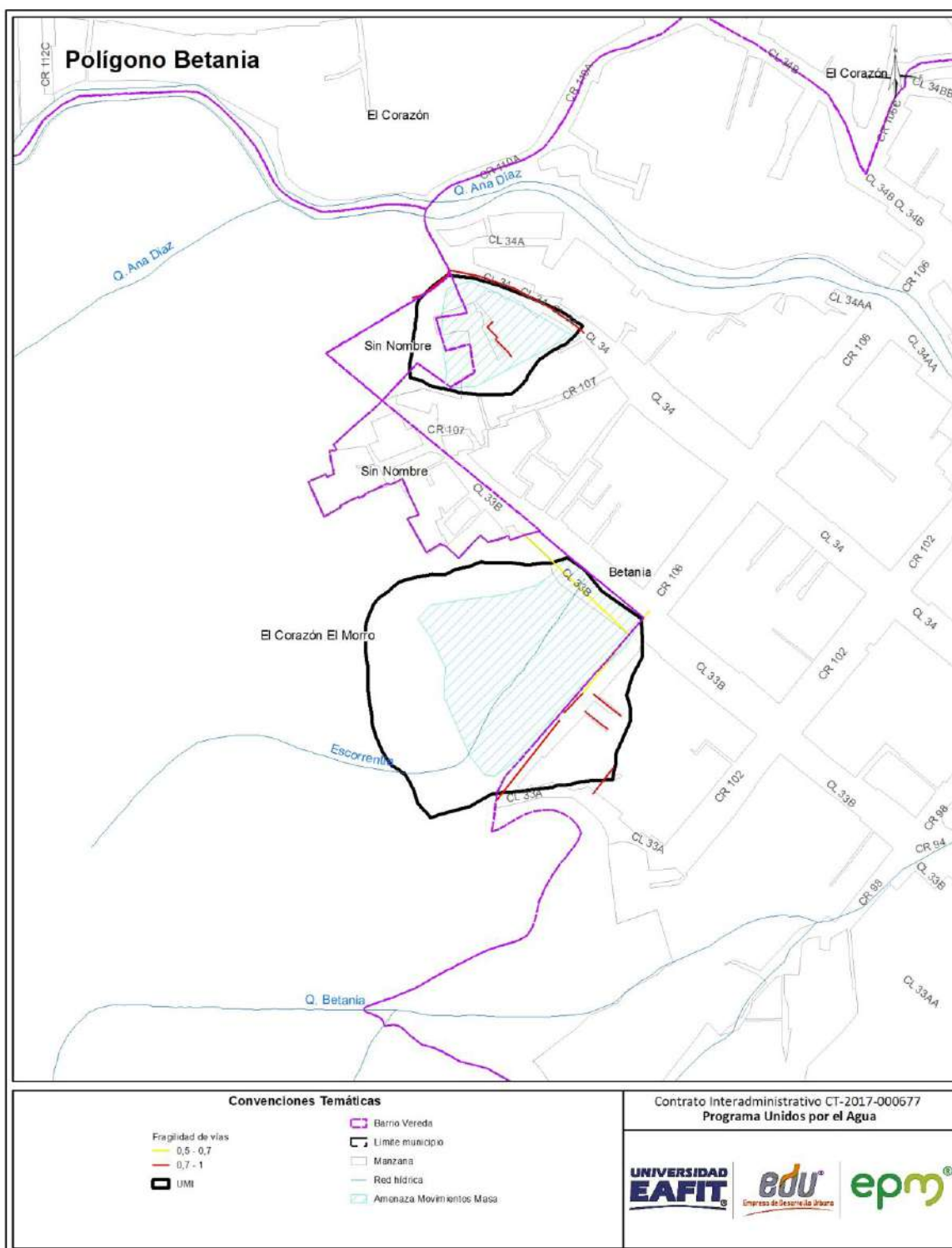


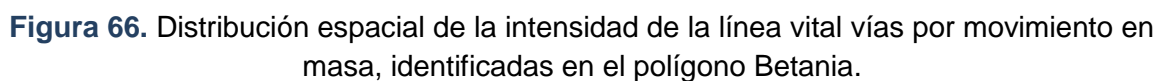
Figura 65. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital vías por movimiento en masa, identificadas en el polígono Betania.

10.2.5 Cálculo de la intensidad de la línea vital – vías

La determinación del parámetro de intensidad en movimientos rápidos para redes viales se define a partir de la ocupación por la masa deslizada o el ancho de vía invadido (determinado a partir de la distancia de viaje calculada de acuerdo con los métodos presentados en el capítulo de amenaza de la Metodología General).

La intensidad alta corresponde al 10% de las vías evaluadas, las cuales se define a partir del ancho invadido u ocupado por la masa deslizada, en el caso de registrarse un movimiento, la vía con esta intensidad se localiza en el centro y el norte del polígono (Figura 66).

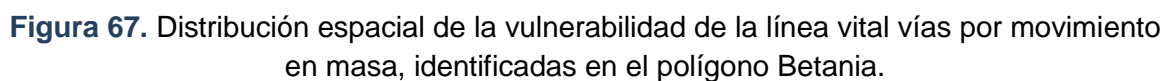
La intensidad baja corresponde al 90% de las vías evaluadas, las cuales se define a partir del ancho invadido u ocupado por la masa deslizada, en el caso de registrarse un movimiento, las vías con esta intensidad se localizan en el norte y en el suroriente del polígono.



10.2.6 Cálculo de la vulnerabilidad de la línea vital – vías

La vulnerabilidad alta corresponde al 90% de las vías evaluadas, las cuales se caracterizan por presentar valores altos de fragilidad y medios a altos de intensidad, las vías con esta vulnerabilidad se localizan en el norte, correspondiente a la calle 34 y en el suroriente, referenciada en la carrera 106 (Figura 67).

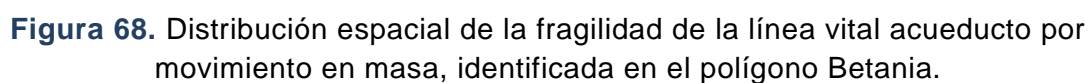
La vulnerabilidad baja corresponde al 10% de las vías evaluadas, las cuales se caracterizan por presentar valores medios de fragilidad y medios a bajos de intensidad, las vías con esta vulnerabilidad se localizan en el centro-oriental y corresponde a la calle 33B del polígono.



10.2.7 Cálculo de la fragilidad del acueducto

La fragilidad representa la respuesta de los elementos expuestos frente a las cargas generadas por la interacción de los movimientos en masa con dichos elementos, para determinar el cálculo de la fragilidad en el caso puntual de la línea vital de acueducto, es necesario contemplar los siguientes parámetros: operador de red, estado de la red, diámetro, si la tubería presenta deflexión, y el tipo de material de la tubería como, PVC, hierro dúctil, polietileno, etc.

La fragilidad en la red del acueducto en el polígono Betania, arrojo en su totalidad valores bajos debido a las características propias de la red y a que no se hallaron daños en esta línea vital, donde se transporta agua potable, abastecida por EPM (Figura 68).



10.2.8 Cálculo de la intensidad del acueducto

Teniendo en cuenta que el fenómeno de movimiento en masa impone una carga uniforme a lo largo de la red del acueducto, la determinación de los umbrales tolerables está dada en función del diámetro de la tubería.

La intensidad de la red de acueducto del polígono Betania es baja, en toda el área de estudio. Dicho cálculo depende netamente de las deflexiones medidas en campo, con respecto a las deflexiones permitidas de acuerdo al diámetro de la tubería (Figura 69).

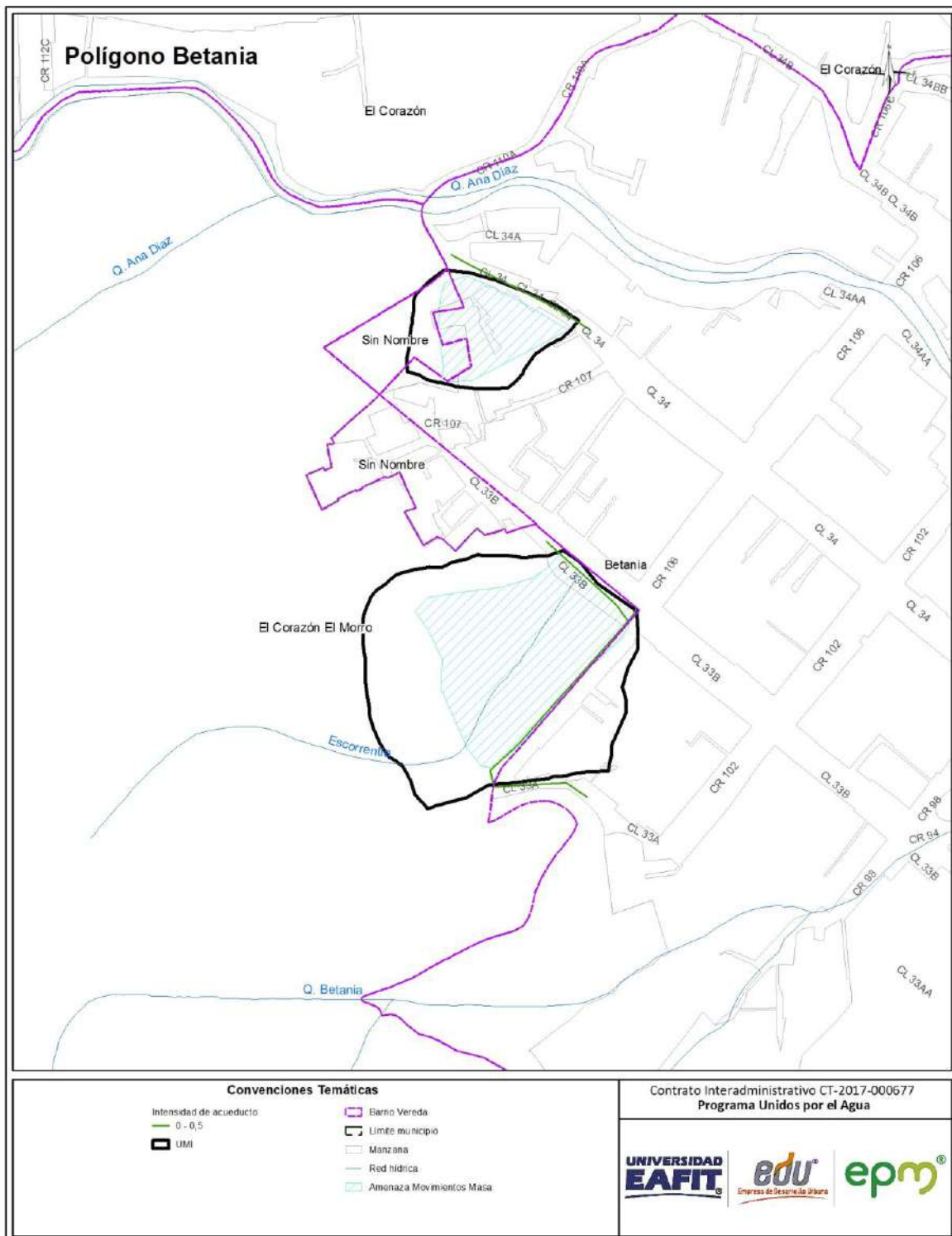


Figura 69. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital acueducto por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.

10.2.9 Cálculo de la vulnerabilidad del acueducto

Para el polígono Betania, predomina la vulnerabilidad baja correspondiente al 100% de los tramos del acueducto evaluados, los cuales se caracterizan por presentar valores bajos de fragilidad y medios a bajos de intensidad, los tramos del acueducto con esta vulnerabilidad se localizan a lo largo del polígono (Figura 70).

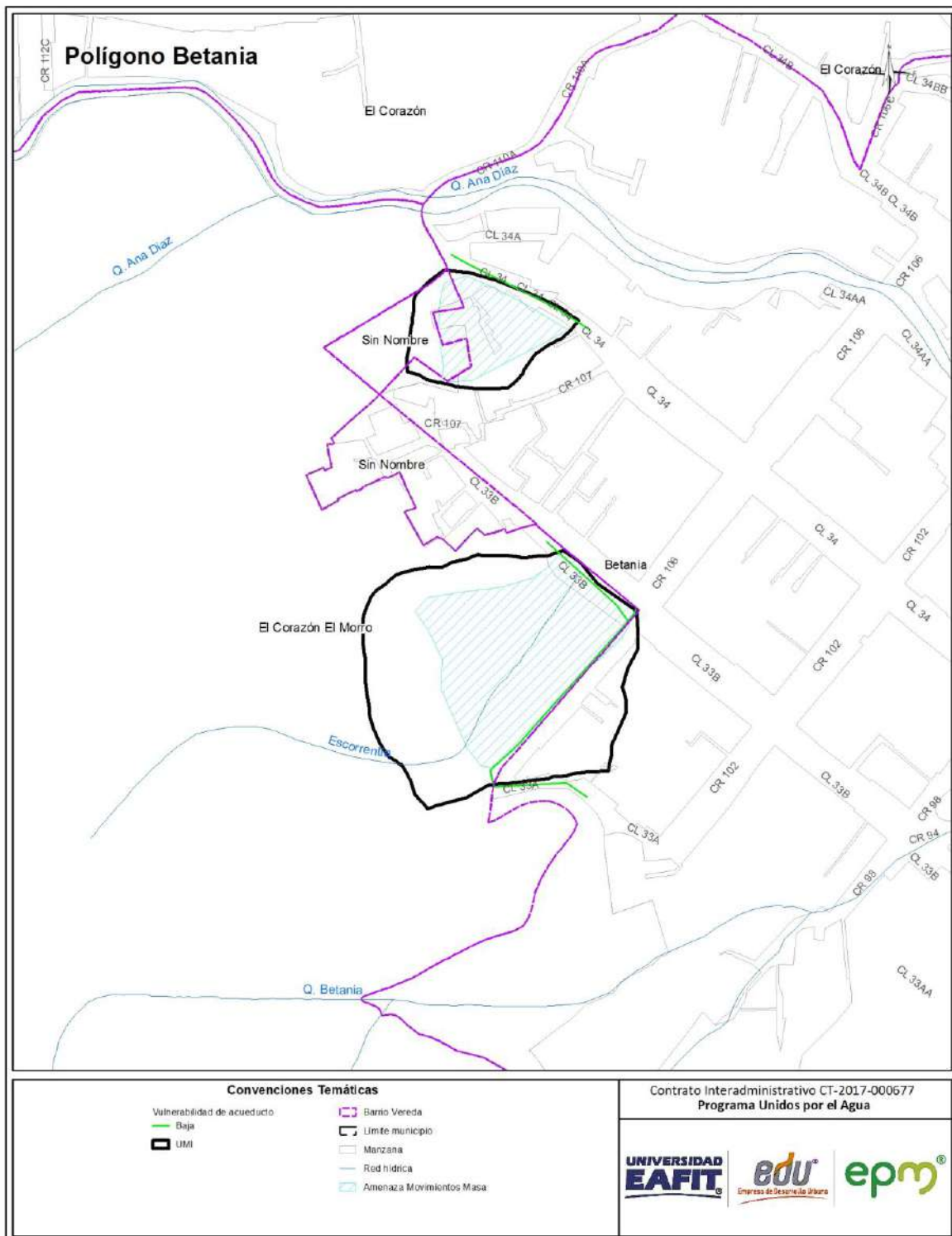
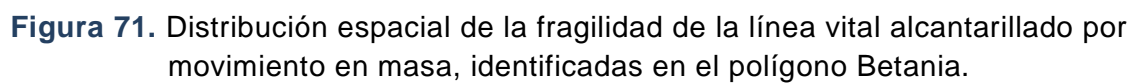


Figura 70. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital acueducto por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.

10.2.10 Cálculo de la fragilidad del alcantarillado

El sistema de alcantarillado también tiene elementos expuestos, el parámetro de fragilidad depende de las características del bien que sufre afectación, es decir, que la fragilidad estará en función, en este caso, del operador de red, el estado de conservación y del material de fabricación de la tubería, como concreto, PVC, polietileno, etc.

La fragilidad en la red del alcantarillado en el polígono Betania, arroja en su totalidad valores bajos debido a las características propias de la red y a que no se hallaron daños en esta línea vital, donde se transportan aguas residuales, recolectadas por EPM (Figura 71).



10.2.11 Cálculo de la intensidad del alcantarillado

El cálculo de la intensidad de la red de alcantarillado se evalúa en función de la tolerancia que tiene el material del mismo. Conforme a las características de los elementos que hacen parte de la red, acorde al SGC se define un umbral tolerable para la misma de 5 cm.

La intensidad del alcantarillado del polígono Betania es baja, en toda el área de estudio. Dicho cálculo depende netamente de las deflexiones medidas en campo, con respecto a las deflexiones permitidas de la tubería (Figura 72).

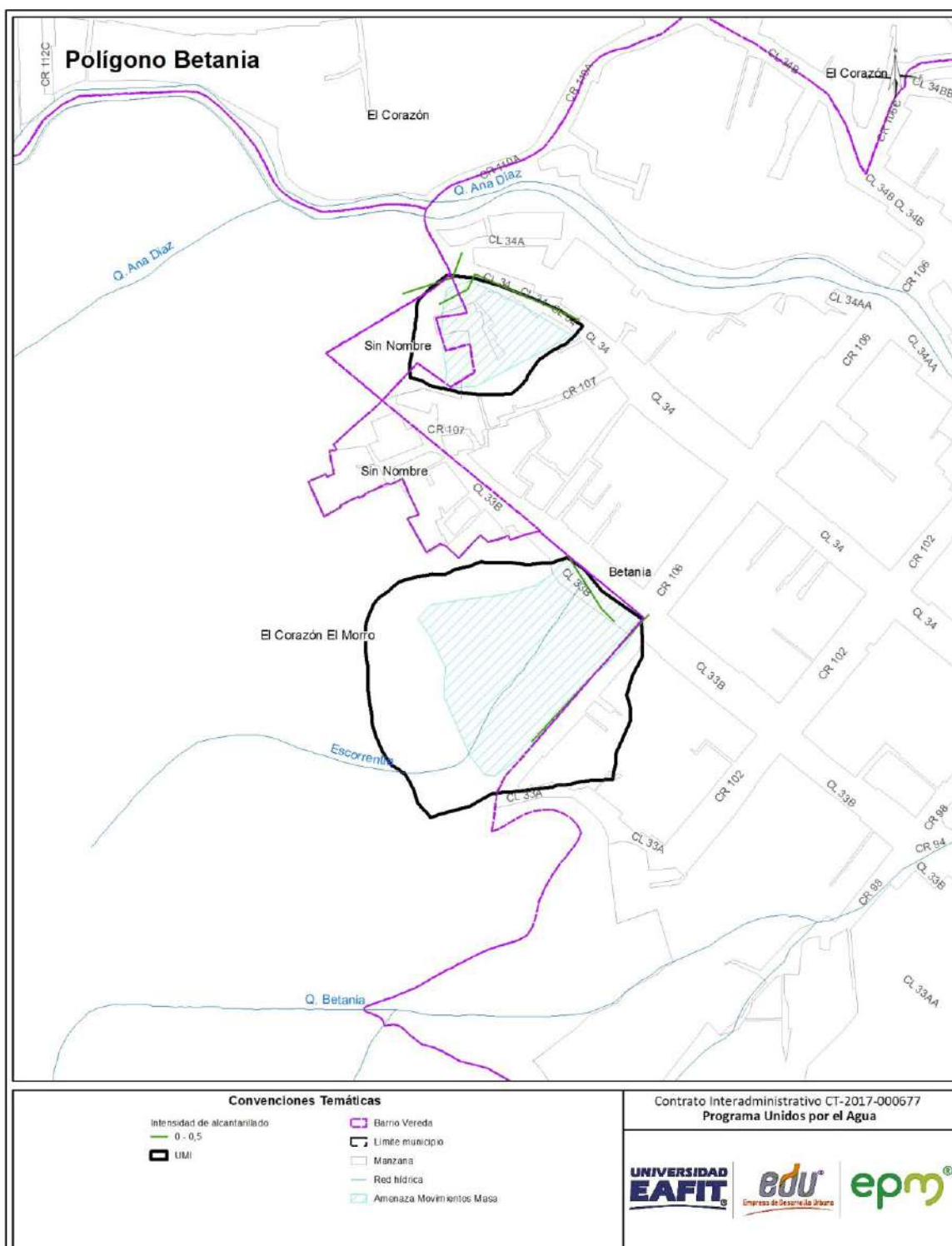


Figura 72. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital alcantarillado por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.

10.2.12 Cálculo de la vulnerabilidad del alcantarillado

Para el polígono Betania, predomina la vulnerabilidad baja correspondiente al 100% de los tramos de la red de alcantarillado evaluados, los cuales se caracterizan por presentar valores bajos de fragilidad y medios a bajos de intensidad, los tramos del acueducto con esta vulnerabilidad se localizan a lo largo del polígono (Figura 73).

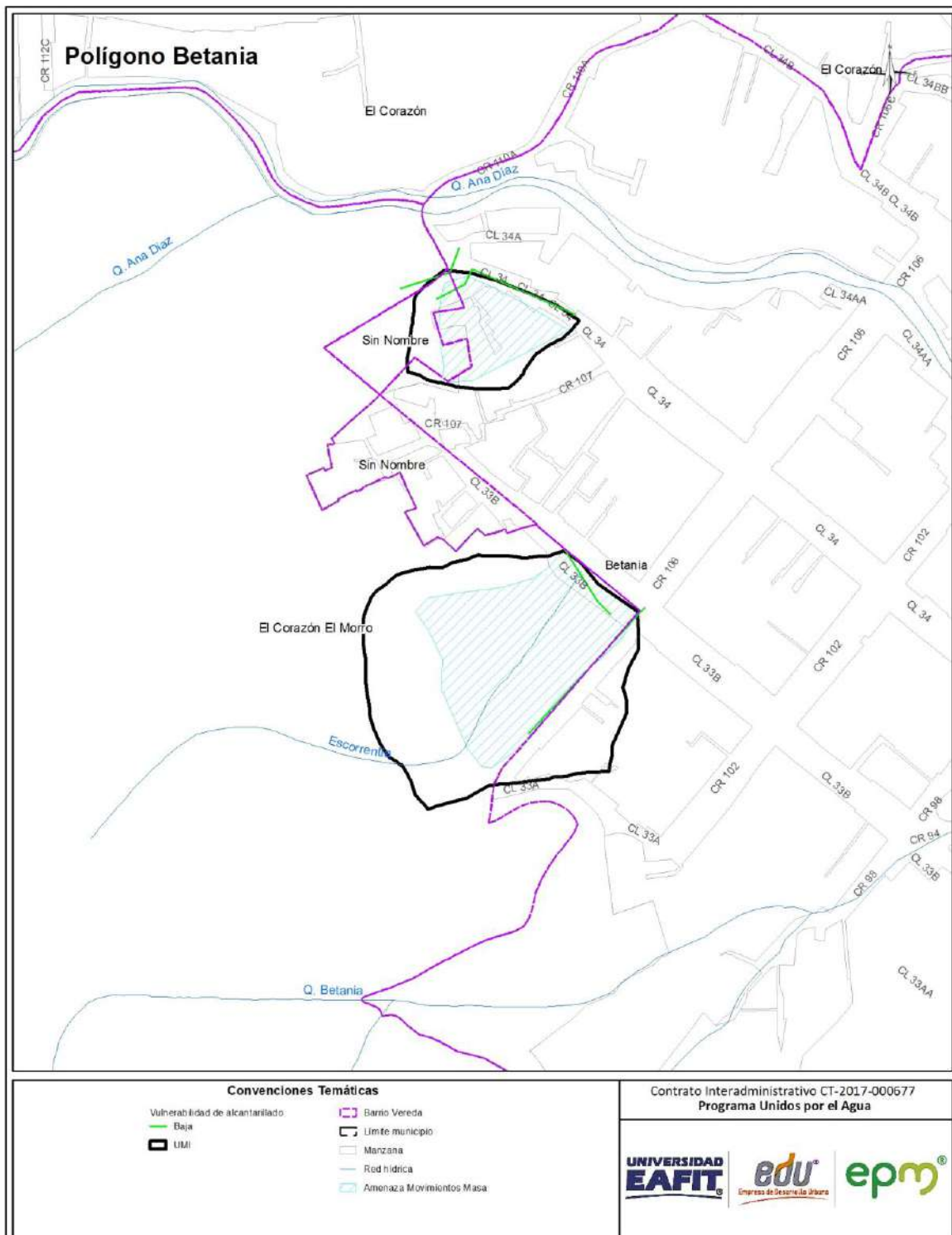


Figura 73. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital alcantarillado por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.

10.3 VULNERABILIDAD DE PERSONAS POR MOVIMIENTOS EN MASA

10.3.1 Análisis de vulnerabilidad de personas.

Para hallar el número de personas en vulnerabilidad, se parte de la vulnerabilidad calculado para las construcciones, (en el cual se cambia básicamente la fragilidad de la construcción por la fragilidad de las personas, del número de niveles de la edificación y el número de habitantes promedio por vivienda, el cual fue calculado en 3,46 de acuerdo con el análisis demográfico realizado por la EDU y suministrado a la universidad EAFIT). Para la clasificación de los valores se toma como una vulnerabilidad alta el rango entre 0,5-1, media el rango de 0,2-0,5 y por último baja entre 0-0,2.

El anterior análisis arroja que para el polígono Betania hay un número estimado de 443 personas en vulnerabilidad alta por movimientos en masa.

10.4 DESCRIPCIÓN DE PROBLEMAS ENCONTRADOS EN LAS CONSTRUCCIONES.

- Las tipologías de las construcciones encontradas en un alto porcentaje, son estructuras ligeras con una fragilidad alta. Por lo tanto, son edificaciones que no cumplen con la Norma Sismo Resistente de 2010 NSR-10.
- Las cimentaciones de las estructuras, en su gran mayoría son poco profundas y en algunos casos, no existen (anexo 5).
- En las construcciones evaluadas se presentan fallas en los morteros de pega, se podría decir que en su mayoría corresponden a morteros con permeabilidad entre media y alta, lo que genera como consecuencia humedades interiores, sobre todo en zonas donde el viento golpea en momentos de lluvia.
- Las fachadas en ladrillo no se encuentran protegidas (hidrofugadas) o con algún recubrimiento, brindando la posibilidad de generar eflorescencias, manchas y ensuciamiento.
- En general la mampostería de las viviendas presenta procesos degradatorios incipientes y se identifica, presencia de cripto eflorescencias aisladas.
- Se observan grietas sin tratamiento, muchas de ellas asociadas a uniones entre distintos materiales de cerramiento (ladrillo, ventanas, puertas).

- Los tipos de cubiertas en losa de concreto, presentan permeabilidad, lo cual generan humedades al interior de las construcciones, lo anterior aplica para edificaciones de un solo nivel con dicho tipo de cubierta.
- Se observaron humedades en general en sobre cimientos, ocasionado por aguas de escorrentía.
- Se evidencio deterioro y desgaste propio del material en cubiertas en fibrocemento, zinc y barro, por malos procesos constructivos y falta de mantenimiento de los sistemas de cubiertas de las estructuras.
- En algunas edificaciones se realiza la recolección de las aguas lluvias de techos mediante bajantes, pero estos son descargados al terreno natural por falta de una red de alcantarillado en la cercanía o desconocimiento del habitante, humedeciendo el suelo y por ende afectando las fundaciones y favoreciendo la amenaza.

11. ZONIFICACIÓN DE RIESGO

De acuerdo a lo planteado en la metodología, se realiza el cálculo del riesgo de dos maneras. La primera, para las construcciones y líneas vitales de manera individual, a partir de la información recolectada en campo por cada uno de los elementos y que se encuentra en una base de datos con los debidos registros fotográficos. Este cálculo se enfoca hacia las acciones particulares en los elementos expuestos.

Por otro lado, se tiene el cálculo del riesgo por polígono a partir de la información de la magnitud de los movimientos (velocidad y profundidad) y de la probabilidad (factor de seguridad). Este último cálculo se enfoca hacia la planificación integral del sector y para la definición de acciones en congruencia con lo definido en el POT del municipio.

11.1 RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA

En el análisis del riesgo por movimientos en masa se presenta tanto en análisis individual de los elementos expuestos como el análisis de riesgos por polígono.

11.1.1 Riesgo de elementos expuestos

Una vez realizados los análisis de campo y laboratorio para todas las variables involucradas en los modelos de riesgo, se obtiene la zonificación de riesgo por movimientos en masa, para las construcciones y líneas vitales del polígono Betania de acuerdo con la tabla de decisión (Tabla 27), como que se presenta a continuación.

Tabla 27. Regla de decisión para el riesgo individual. Modificado de Phoon (2008) citado por Alcaldía de Medellín (2015).

NIVEL DE AMENAZA	VULN. ALTA	VULN. MEDIA	VULN. BAJA
ALTA	ALTO	ALTO	MEDIO
MEDIA	ALTO	MEDIO	BAJO
BAJA	BAJO	BAJO	BAJO

11.1.1.1 Análisis de riesgo de las construcciones

En el polígono Betania, se evidencia un nivel de riesgo alto para las construcciones, que corresponde al 55% de las edificaciones, las cuales se caracterizan por

presentar valores altos de vulnerabilidad y medios a altos para la amenaza, las construcciones con este riesgo se localizan en el norte y el centro del polígono (Figura 74).

El riesgo bajo corresponde al 45% de las edificaciones, las cuales se caracterizan por presentar valores altos de vulnerabilidad y medios a bajos para la amenaza, las construcciones con esta vulnerabilidad se localizan en el suroriente del polígono.

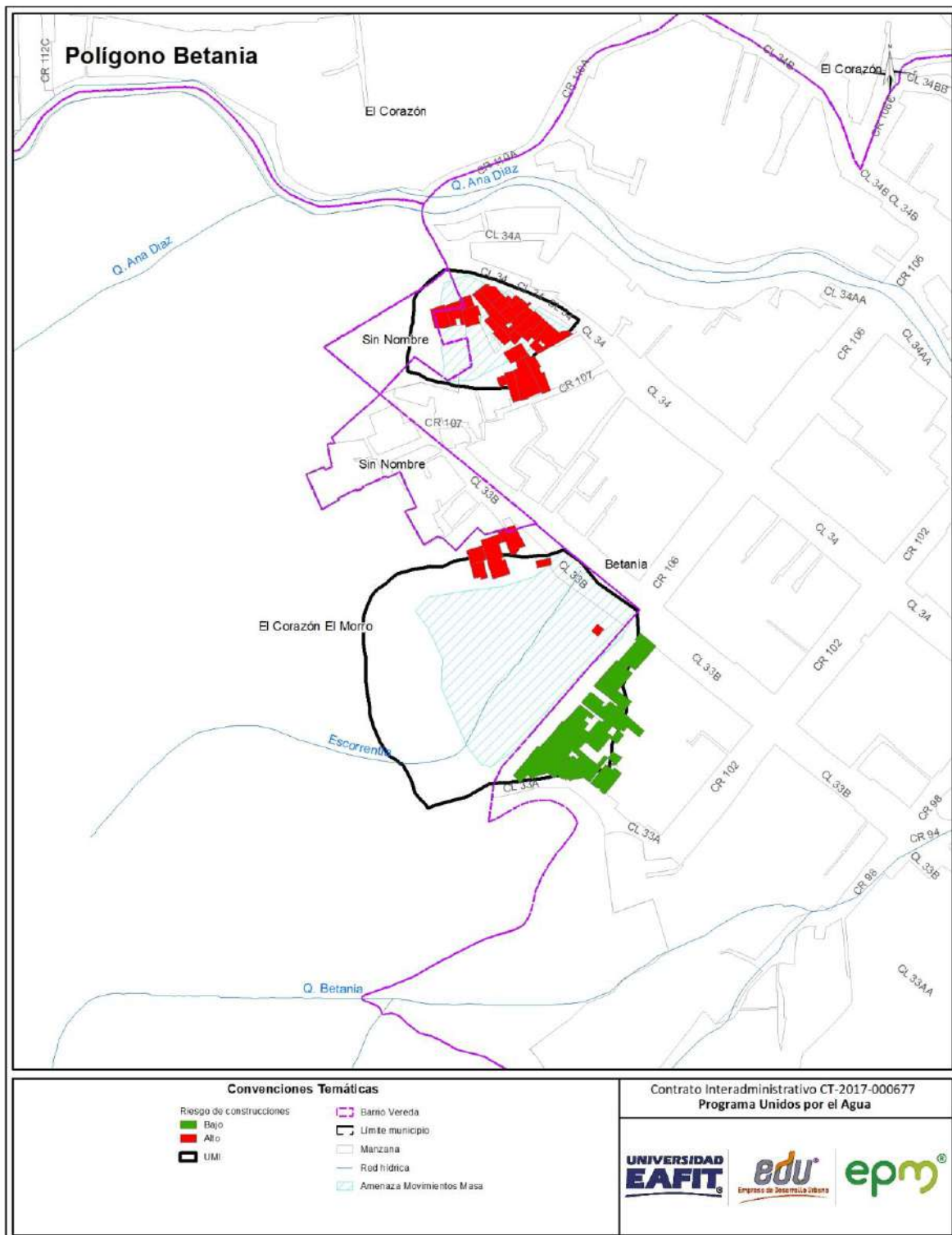
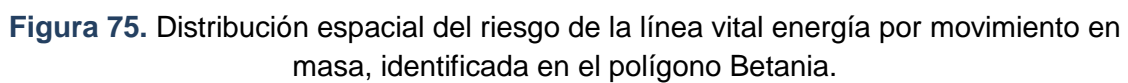


Figura 74. Distribución espacial del riesgo de las construcciones por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.

11.1.1.2 Análisis de riesgo de línea vital - energía

En el polígono Betania, se evidencia un nivel de riesgo alto que corresponde al 68% de los postes evaluados, los cuales se caracterizan por presentar valores altos de vulnerabilidad y medios a altos para la amenaza, los postes con este riesgo se localizan en el norte y el suroriente del polígono (Figura 75).

El riesgo bajo corresponde al 32% de los postes evaluados, los cuales se caracterizan por presentar valores medios a altos de vulnerabilidad y bajos para la amenaza, los postes con este riesgo se localizan en el suroriente, sobre la carrera 106 del polígono.



11.1.1.3 Análisis de riesgo de línea vital - vías

En el polígono Betania, se evidencia un nivel de riesgo alto que corresponde al 18% de las vías evaluadas, las cuales se caracterizan por presentar valores altos de vulnerabilidad y altos para la amenaza, las vías con este riesgo se localizan en el norte del polígono.

El riesgo medio corresponde al 9% de las vías evaluados, los cuales se caracterizan por presentar valores medios de vulnerabilidad y medios para la amenaza, las vías con este riesgo se localizan en el oriente del polígono, correspondiente a la calle 33B.

El riesgo bajo corresponde al 72% de las vías evaluadas, las cuales se caracterizan por presentar valores medios a bajos de vulnerabilidad y medios a bajos para la amenaza, las vías con este riesgo se localizan en el norte y el suroriente del polígono, corresponden a la calle 34 y la carrera 106 (Figura 76).

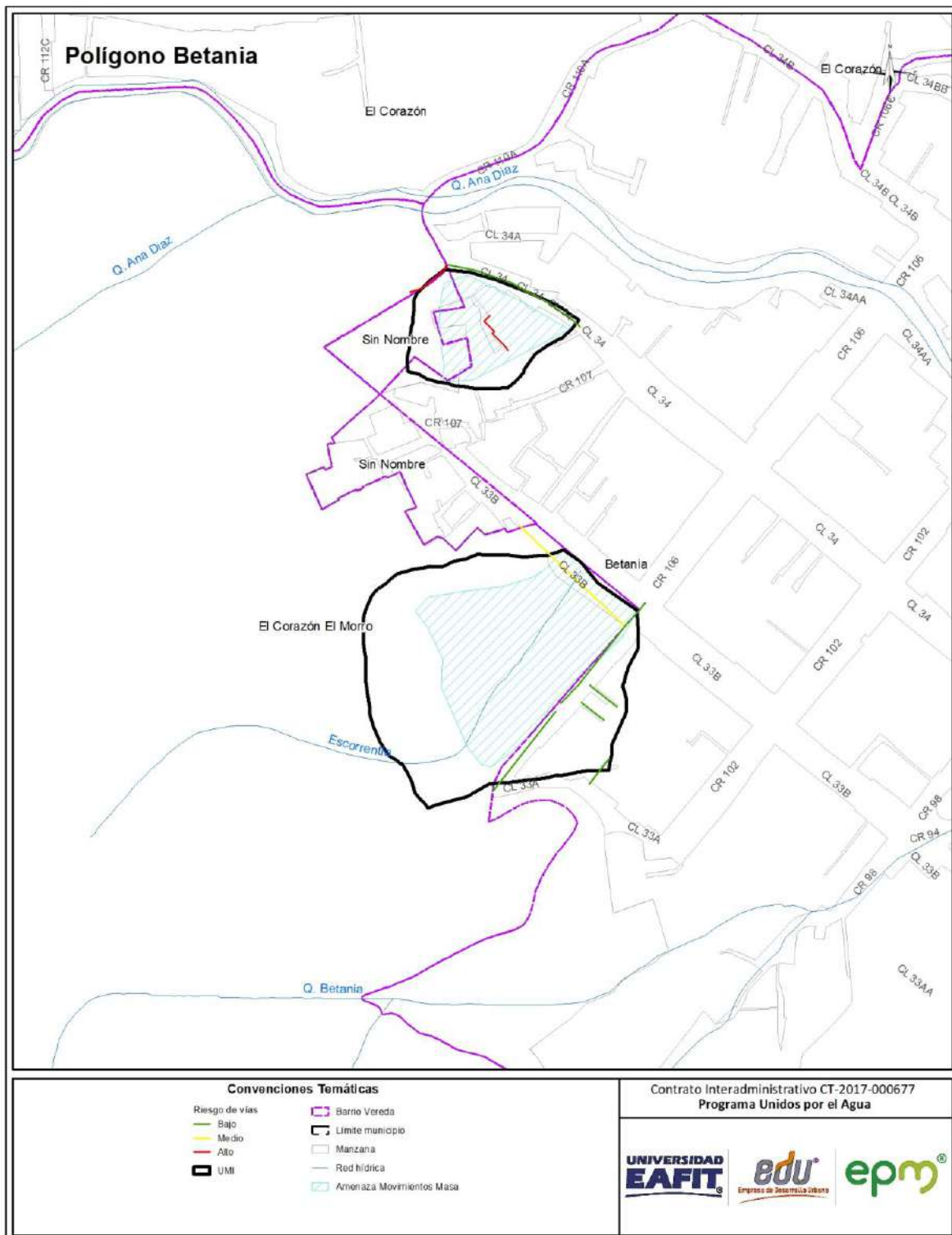
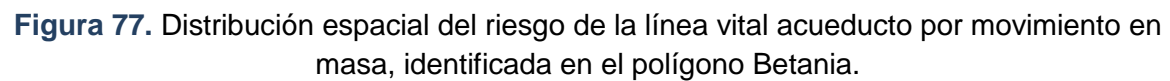


Figura 76. Distribución espacial del riesgo de la línea vital vía por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.

11.1.1.4 Análisis de riesgo de línea vital - acueducto

En el polígono Betania, se evidencia un nivel de riesgo medio que corresponde al 22% de los tramos de acueducto evaluados, los cuales se caracterizan por presentar valores medios de vulnerabilidad y medios para la amenaza, se localizan en el sur, sobre la calle 33B y la carrera 106 del polígono.

El riesgo bajo corresponde al 78% de los tramos de acueducto evaluados, los cuales se caracterizan por presentar valores bajos de vulnerabilidad y medios a bajos para la amenaza, los tramos de acueducto con este riesgo se localizan en el norte y sur, sobre la calle 34, calle 33A y carrera 106 del polígono (Figura 77).



11.1.1.5 Análisis de riesgo de línea vital – alcantarillado

En el polígono Betania, se evidencia un nivel de riesgo medio que corresponde al 70% de los tramos de alcantarillado evaluados, los cuales se caracterizan por presentar valores medios de vulnerabilidad y medios para la amenaza, se localizan a lo largo del polígono.

El riesgo bajo corresponde al 30% de los tramos de acueducto evaluados, los cuales se caracterizan por presentar valores bajos de vulnerabilidad y medios a bajos para la amenaza, los tramos de acueducto con este riesgo se localizan en el norte y suroriente, sobre la calle 34 y carrera 106 del polígono (Figura 78).

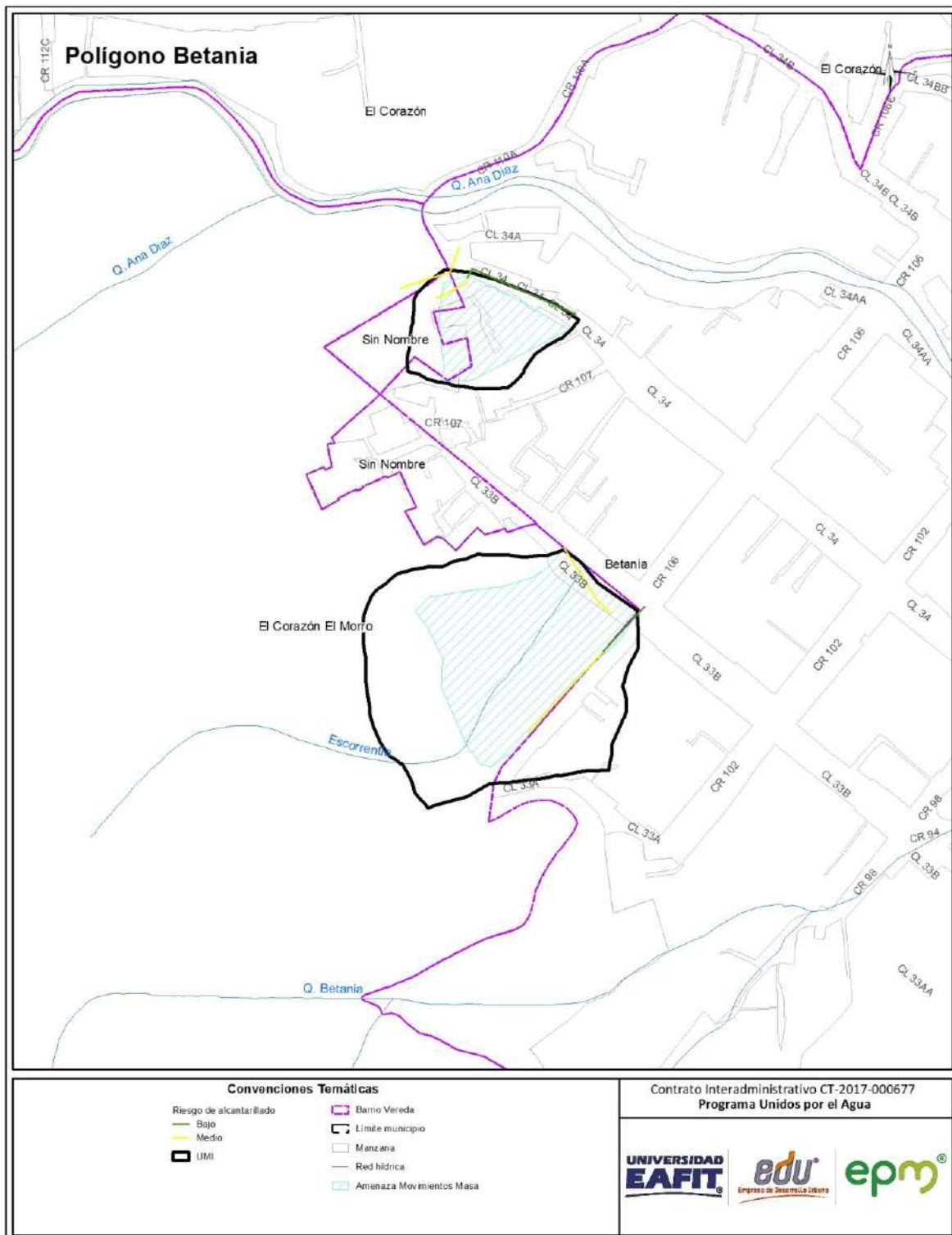


Figura 78. Distribución espacial del riesgo de la línea vital alcantarillado por movimiento en masa, identificada en el polígono Betania.

11.1.1.6 Análisis de riesgo de personas.

Para hallar el número de personas en riesgo, se parte del nivel de riesgo calculado para las construcciones, (en el cual se cambia básicamente la fragilidad de la construcción por la fragilidad de las personas, todo esto de acuerdo a los parámetros y calificaciones definidos en el documento metodológico, más específicamente en el numeral 3.3.1. (Anexo 1.), del número de niveles de la edificación y el número de habitantes promedio por vivienda, el cual fue calculado en 3,46 de acuerdo con el análisis demográfico realizado por la EDU y suministrado a la universidad EAFIT.

El anterior análisis arroja que para el polígono Betania hay un número estimado de 239 personas en riesgo alto y 204 personas en riesgo bajo.

11.1.2 Riesgo por polígono

Teniendo en cuenta la zonificación de amenazas obtenidas, al igual que la profundidad y velocidad de los procesos morfodinámicos probables a generarse, se establece que para el polígono Betania se obtienen zonas de riesgo alto, medio y bajo, como se describen teniendo en cuenta la siguiente tabla de decisión (Tabla 28, Figura 79).

Tabla 28. Regla de decisión para el riesgo por polígono para movimientos en masa.

Factores	Magnitud de la amenaza	Amenaza según factores seguridad	Índice de vulnerabilidad (Edificaciones)	Zona de riesgo por movimientos en masa
Velocidad Alta / Profundidad Alta	Muy Alta	Alta	1.0	Extremadamente alto/No Mitigable/Soluciones Alto Costo
Velocidad Alta / Profundidad Alta	Muy Alta	Media	1.0	Riesgo Alto
Velocidad Alta / Profundidad Alta	Muy Alta	Baja	1.0	Bajo
Velocidad Media - Baja / Profundidad Alta	Alta	Alta	0,6	Riesgo Alto
Velocidad Media - Baja / Profundidad Alta	Alta	Media	0,6	Medio
Velocidad Media - Baja / Profundidad Alta	Alta	Baja	0,6	Bajo
Velocidad Media - Alta / Profundidad Media	Alta	Alta	0,7	Riesgo Alto
Velocidad Media - Alta / Profundidad Media	Alta	Media	0,7	Riesgo Alto
Velocidad Media - Alta / Profundidad Media	Alta	Baja	0,7	Bajo
Velocidad Baja / Profundidad Media	Media	Alta	0,5	Riesgo Alto
Velocidad Baja / Profundidad Media	Media	Media	0,5	Medio
Velocidad Baja / Profundidad Media	Media	Baja	0,5	Bajo
Velocidad Alta / Profundidad Baja	Media	Alta	0,4	Medio
Velocidad Alta / Profundidad Baja	Media	Media	0,4	Medio
Velocidad Alta / Profundidad Baja	Media	Baja	0,4	Bajo
Velocidad Media - Baja / Profundidad Baja	Baja	Alta	0,1	Medio
Velocidad Media - Baja / Profundidad Baja	Baja	Media	0,1	Bajo
Velocidad Media - Baja / Profundidad Baja	Baja	Baja	0,1	Bajo

Riesgo alto mitigable: es definido por el Decreto 1626 de 2015 como aquellas áreas en las cuáles el fenómeno es controlable a través de la implementación de obras de mitigación y/o protección (medidas estructurales y/o no estructurales) cuyas consecuencias de tipo económico, ambiental, financiero y social traen consigo un costo razonable y no se hace necesario el reasentamiento de la población.

Esta clasificación se define en el sector de la cancha polideportiva, asociada a las unidades ladera cóncava, corta y abrupta y ladera convexa, corta y suave, sobre la margen sur oriental del polígono 7003-1; geológicamente está relacionada a llenos antrópicos y al saprolito del stock de Altavista y pendientes muy abruptas. A partir de los análisis de estabilidad se establece que los movimientos en masa tienen una probabilidad alta de ocurrencia, y exhiben profundidades de moderadas a altas y velocidad alta, por lo que se clasifican como de riesgo alto. Se destaca que debido a que las obras propuestas en el presente estudio garantizan la estabilidad y la permanencia de los elementos expuestos allí localizados, se define esta zona como de alto riesgo mitigable.

Riesgo Medio: es definido por el Decreto 1626 de 2015 aquellas zonas en las cuales los procesos de inestabilidad o cualquier otro fenómeno pueden ser controlados con medidas de mitigación menores, que garanticen la seguridad de las edificaciones ubicadas en el área de influencia de los fenómenos.

Como zona de riesgo medio se ubica corresponde a la ladera de fuerte pendiente ubicada en el polígono 1312-1, así como a la primera línea de viviendas sobre la calle 34 en inmediaciones de la entrada a la cantera La Esmeralda, y a las viviendas ubicadas en la parte posterior de la carrera 107, que al igual que la zona anterior se encuentran aledañas a la ladera. Esta zona presenta una probabilidad media a la ocurrencia de movimientos en masa rápidos de espesor superficial; igualmente las obras propuestas en este estudio, mejoran la estabilidad de esta zona, disminuyendo el nivel de riesgo.

Riesgo Bajo: Corresponde a aquellas áreas donde sólo se requieren medidas mínimas de prevención y/o de control de amenaza y vulnerabilidad (Decreto 1626 de 2015). Las zonas de riesgo bajo, coinciden con las identificadas como de amenaza baja y ocupadas con viviendas. En el área del polígono corresponde a la primera línea de viviendas ubicadas en la calle 34 en inmediaciones de la carrera 107 y a las ubicadas sobre la margen occidental de la carrera 106 entre las calles 33A y 33B. Se destaca que debido a que la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa es baja, no existe un riesgo tácito para esta zona del polígono.

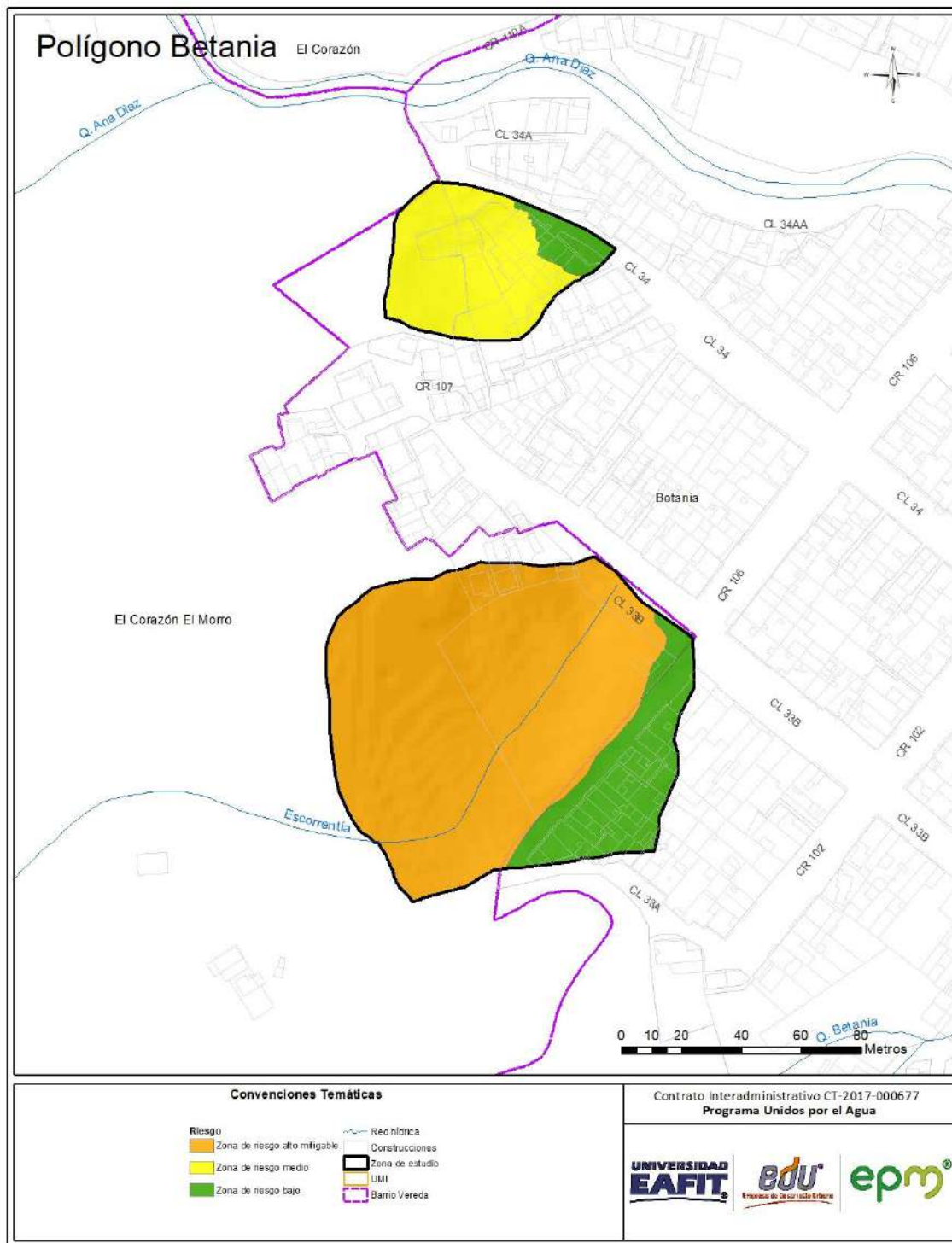


Figura 79. Mapa de riesgo por polígono del polígono Betania

Adicionalmente, las categorías de riesgo definidas en este informe, pueden variar en función de la amenaza, la cual es un proceso dinámico en el tiempo, y cuya

condición puede cambiar de acuerdo con la recurrencia de movimientos en masa ocasionados por prácticas inadecuadas para la construcción y mal manejo de aguas lluvias y residuales.

Así mismo, una vez se ejecuten las obras propuestas, el grado de riesgo en categorías alto y medio, disminuyen a riesgo bajo, es por esto que se deben atender las recomendaciones que se presentan en el siguiente capítulo.

12. APTITUD GEOLÓGICA

Esta zonificación se realiza partiendo de los aspectos topográficos, geológicos, geomorfológicos y de procesos morfodinámico identificados durante el trabajo de campo y los cuales condicionan en forma directa el grado de estabilidad de las laderas.

A estos aspectos se agregó la evaluación de la estabilidad de las laderas y las condiciones hidráulicas considerando las obras necesarias para alcanzar factores de seguridad ajustados a los requerimientos existentes en este aspecto. La zonificación referente a la aptitud geológica para el uso y ocupación del suelo se presenta de acuerdo con la clasificación utilizada por las “Directrices y lineamientos para la elaboración de los estudios geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, hidráulicos, hidrogeológicos y geotécnicos para intervenciones en zonas de ladera, en el Valle de Aburrá”.

Se consideran tres tipos de zona de acuerdo a las características geológicas y geomorfológicas y a la complejidad de los procesos morfodinámicos identificados, las cuales se describen a continuación (Figura 80):

- **Zonas Aptas:** Corresponden a zonas que presentan alto grado de estabilidad, no se aprecia la ocurrencia de procesos morfodinámicos activos e inactivos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa que afecten la estabilidad global del predio de interés y de la UMI asociada; la estabilidad global de estas zonas está condicionada al tipo de intervención que se proyecte y al uso y manejo que se dé a estas y a la UMI asociada (Acuerdo 09 de 2012).

En esta categoría se incluye la zona definida como de amenaza baja por movimientos en masa, en condiciones estáticas, y que en el análisis de runout no se obtiene probabilidad de verse afectada por la acumulación de materiales asociados a la ocurrencia de movimientos en masa en la zona aledaña. En esta categoría se identifica en dos sectores, el primero en el polígono norte (1312-1) corresponde a la zona donde se localiza la primera línea de viviendas sobre la calle 34, en inmediaciones de la vía de ingreso de la cantera La Esmeralda; el segundo se sitúa en el polígono sur (7003-1), en el área ubicada sobre la carrera 106 entre las calles 33A y 33B.

Estas zonas se caracterizan por presentar pendientes entre los rangos suaves a inclinadas en zonas ya urbanizadas, conformadas por materiales asociados al saprolito del Stock de Altavista y llenos antrópicos.

- **Zonas Aptas con Restricciones Altas:** En las cuales se evidencia la ocurrencia de procesos morfodinámicos activos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa localizados en el predio de interés y en la UMI asociada; la estabilidad global de estas zonas dependerá del manejo que se dé a los procesos morfodinámicos y al tipo de intervención que se proyecte sobre estas. El estudio debe evaluar la viabilidad técnica y económica de las obras de estabilización proyectadas dentro del lote y la UMI asociada (Acuerdo 09 de 2012).

En esta categoría de incluyen las zonas catalogadas en la zonificación de amenaza total, como de amenaza alta por movimientos en masa, ubicada en la zona central del polígono norte (1312-1). Corresponde a una zona de pendientes muy abruptas, ubicada en la parte posterior de la primera línea de viviendas de la calle 34. Geológicamente está asociada al saprolito del Stock de Altavista, y está relacionada a una antigua cicatriz de un movimiento en masa, parte de ella se encuentra intervenida antrópicamente en lo relacionado a la construcción de vivienda, solares de vivienda y adecuaciones para la acumulación de materiales.

- **Zonas No Aptas:** Son aquellas con evidente inestabilidad por la ocurrencia de procesos morfodinámicos activos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa dentro del lote de interés y la UMI asociada; el estudio considera que las obras de estabilización proyectadas son técnicamente complejas y de alto costo con respecto a las inversiones proyectadas en la zona o predio de interés. Las zonas con restricciones normativas se considerarán como No Aptas (Acuerdo 09 de 2012).

Esta categoría corresponde a las áreas definidas como suelo de protección en el acuerdo 48 de 2015. En el polígono se ubica en dos sectores, el primero se localiza sobre el costado occidental del polígono norte (1312-1), en inmediaciones del ingreso a la cantera La Esmeralda, el segundo y de mayor corresponde a la zona central y noroccidental del polígono sur (7003-1), en estas áreas confluyen varias figuras de protección y conservación ambiental (red de conectividad ecológica, retiros a corrientes hídricas, áreas de protección para la producción)



13. RECOMENDACIONES

Las condiciones topográficas y la ocupación de las áreas evaluadas con viviendas o infraestructura, se constituyen en factores determinantes en la definición de propuestas para el mejoramiento de la estabilidad del polígono Betania, dado que su implementación podría generar modificaciones sustanciales en estos aspectos que implican altos costos económicos y sociales.

Las recomendaciones que se presentan a continuación tienen como objetivo disminuir los niveles de riesgo identificados en el polígono en estudio, las cuales corresponden a medidas principalmente de tipo estructural que incluyen tantas obras de ingeniería que buscan la estabilización puntual de sitios críticos como obras complementarias que se deben adelantar en todo el polígono de interés, por lo que para garantizar la estabilidad de la zona y el cambio en las restricciones establecidas se requiere de una intervención de tipo integral en donde se ejecuten de forma conjunta los planteamientos aquí establecidos.

13.1 RECOMENDACIONES GEOTÉCNICAS

Para el polígono Betania (sector perfil 1) se han planteado como alternativas para el mejoramiento de la estabilidad la implementación de dos muros de contención cimentados en pilas pre-excavadas amarradas con una viga cabezal. Para el sector correspondiente al perfil 2 se recomienda reconformar el talud retirando 2 metros de lleno existente y la construcción de 2 líneas de subdrenes. Sin embargo, para garantizar el funcionamiento de estas obras es necesario implementar sistemas de alcantarillado específicamente en la zona correspondiente al perfil 2 ya que la disposición de aguas residuales domésticas sobre el talud saturan el suelo aumentando las probabilidades de deslizamiento.

A continuación, se analizará la estabilidad de cada uno de los perfiles que se tuvieron en cuenta en las evaluaciones de la condición actual, pero ahora bajo la consideración de que se incluirán las obras o propuestas de mejoramiento de la estabilidad para cada uno de dichos sectores.

13.1.1 Análisis de estabilidad condición proyectada

Perfil 1: Para el perfil 1 el análisis de estabilidad en la situación actual arrojó un factor de seguridad de 1.1 y 0.7 para la condición estática y pseudo-estática respectivamente, con lo cual se justifica la necesidad de implementar obras de mejoramiento de la estabilidad de la ladera.

Bajo la consideración anterior, se recomendó reconformar la parte superior del talud y construir un sistema de contención compuesto por dos muros de contención de 4 metros de altura cimentados en pilas de 1.5m de diámetro, separadas 3 metros centro a centro. La longitud de las pilas 12 metros para el muro inferior que reemplazara el gavión actualmente deformado y 20 metros para la contención a ubicar en la parte superior.

Los muros deben contar con oídos entre pilas con el fin de permitir el drenaje del agua y construcción de filtro detrás del muro en su base.

Antes de elegir la alternativa presentada se reconformo el talud en la parte superior retirando parte del material y al realizar el análisis de estabilidad no garantiza estabilidad en condiciones pseudo-estáticas.

.A continuación se presentan los análisis de estabilidad con las obras proyectadas, con un factor de seguridad medio de $FS=2.0$ (Figura 81).

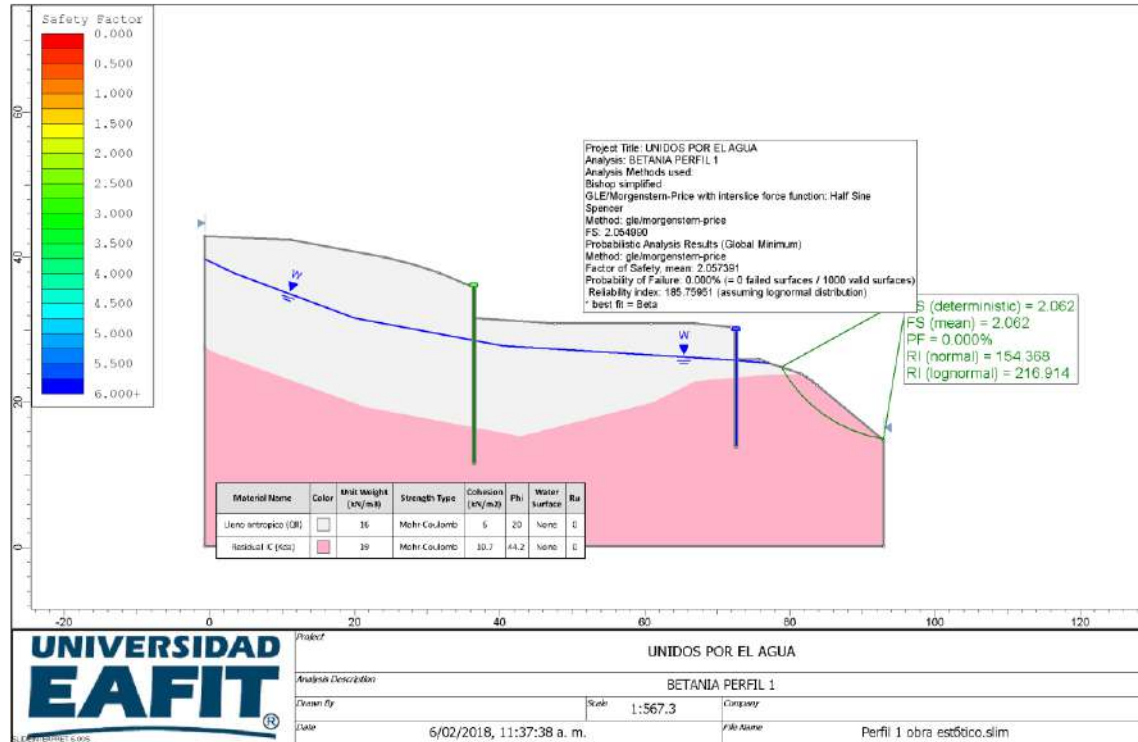


Figura 81. Análisis estabilidad perfil 1 Alternativa recomendada, condición estática.

Para el análisis seudoestático se obtuvo un factor de seguridad medio de 1.2 y una probabilidad de falla de 4.5%. Estos valores son superiores a lo recomendado por la NSR 10 (Figura 82).

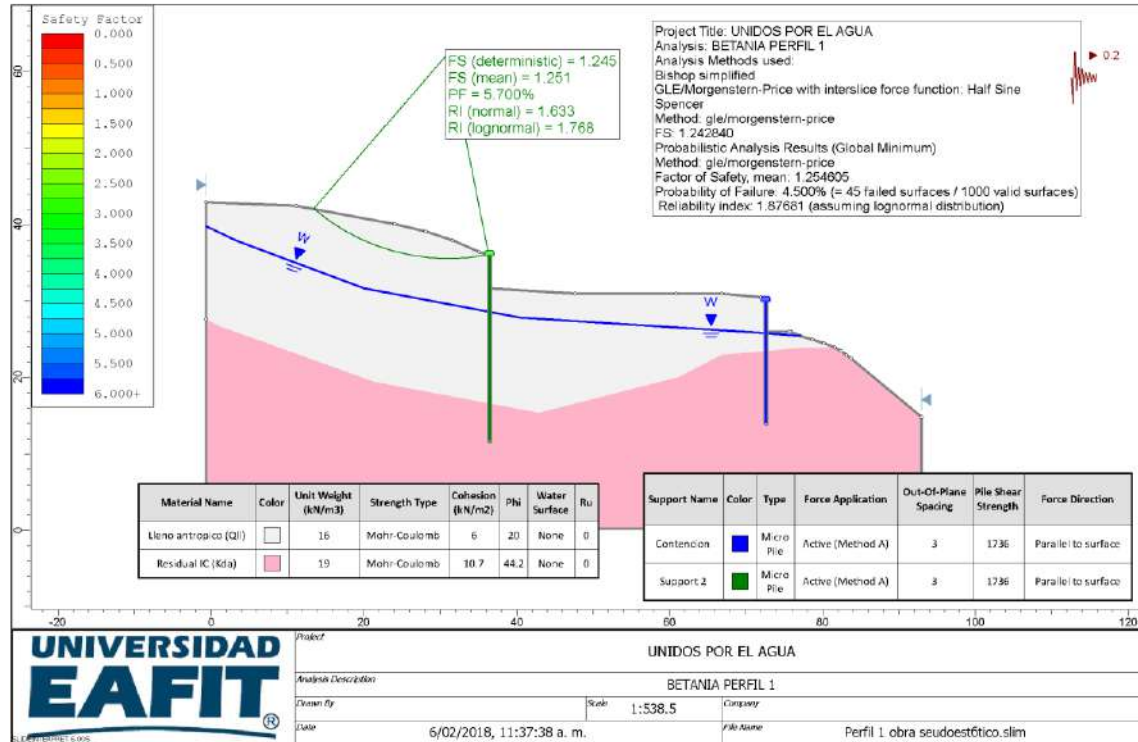


Figura 82. Análisis estabilidad perfil 1 Alternativa recomendada, condición pseudo-estática

Perfil 2: Se recomienda para el perfil 2 retirar el lleno ubicado en la parte superior del talud con un espesor entre 2 y 3 metros, además construir un arreglo de subdrenes compuesto por 2 hileras de subdrenes con una separación de 3 metros en la horizontal y 4 metros en la vertical, diámetro 2" y longitud de 20 metros.

Sin embargo, para garantizar el funcionamiento de estas obras es necesario implementar sistemas de alcantarillado específicamente en la zona correspondiente al perfil 2 ya que la disposición de aguas residuales domésticas sobre el talud saturan el suelo aumentando las probabilidades de deslizamiento.

Los factores de seguridad obtenidos son $FS=1.8$ y $FS=1.2$ en condiciones estáticas y pseudo-estáticas respectivamente lo cual garantiza estabilidad y cumple con la norma NSR 2010. A continuación se muestran los análisis de estabilidad realizados (Figura 83 y Figura 84).

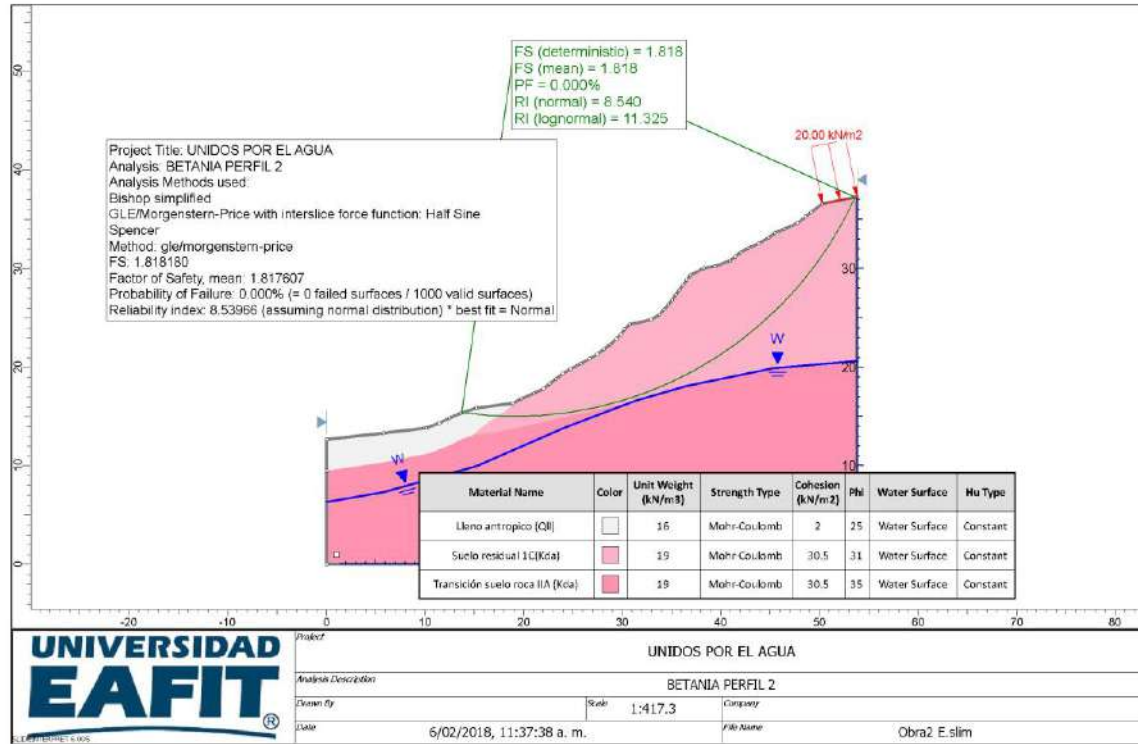


Figura 83. Análisis estabilidad perfil 2. Solución final condición estática.

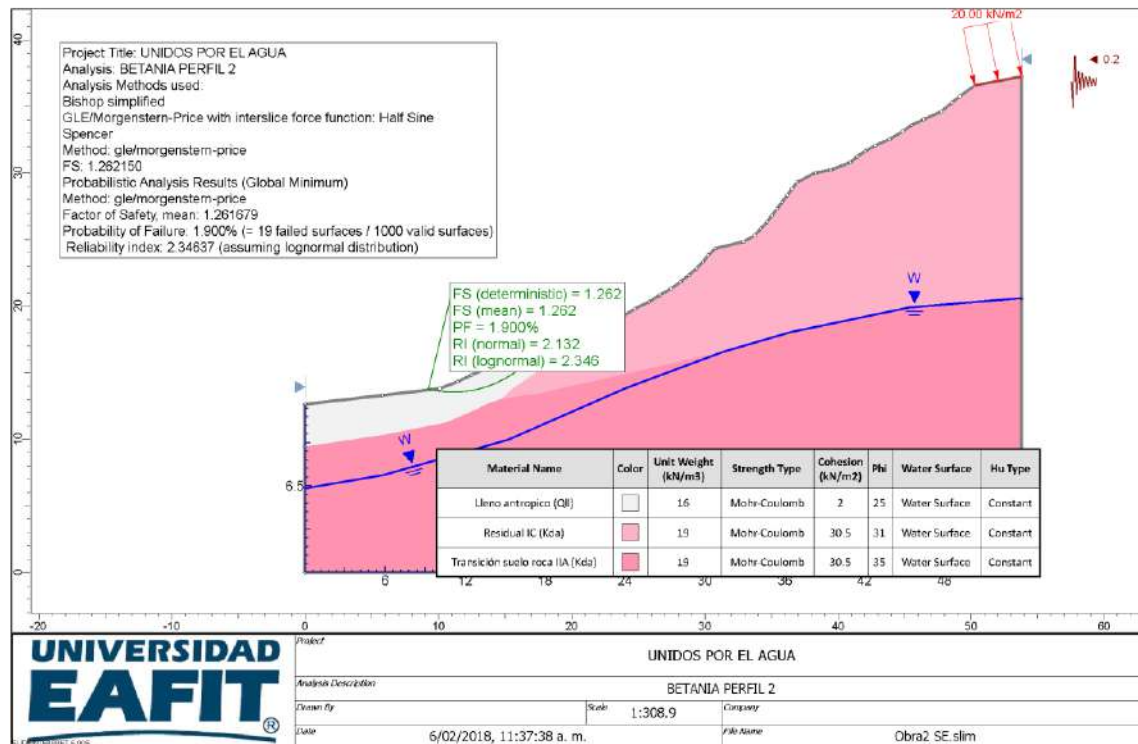


Figura 84. Análisis estabilidad perfil 2. Solución final, condición pseudo-estática.

El diseño de las pilas se realizó utilizando el software Allpile. Las memorias de cálculo se presentan en el Anexo 4 de este informe.

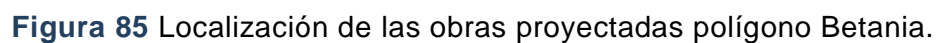
13.2 DIMENSIONAMIENTO GEOTÉCNICO DE OBRAS

Para el polígono Betania circuito El Corazón, se ha recomendado con base en las observaciones de campo y los análisis de estabilidad del sector la implementación de una serie de obras que buscan mantener y mejorar la estabilidad de la zona evaluada. Como se ha mencionado anteriormente, las obras que se recomiendan son las siguientes (Figura 85):

Para el sector del perfil No 1 se propone la construcción de dos (2) muros de contención con altura de 4 metros cimentados en pilas. El muro superior con una longitud de 36 metros cimentado en pilas con longitudes de 20 metros, en tanto que el muro inferior (donde actualmente existe un muro en gavión deformado) tendrá pilas con longitudes de 12 metros. Estas pilas con las cuales se cimentarán los

muros tendrán diámetro de 1.5 metros y se espaciarán cada tres metros entre ejes. Estas pilas se unirán mediante una viga cabezal que permitirá rigidizar el sistema haciendo que las estructuras funcionen de manera integral.

Para la zona correspondiente al perfil No 2, se ha considerado conveniente para mejorar la estabilidad del sector, reconfiguración del talud retirando entre 2 y 3 metros de lleno en las zonas donde este se encuentre. Adicionalmente se propone la construcción de una batería de subdrenes horizontales de 25 m de longitud, espaciados cada 3 metros horizontalmente y 4 metros en la vertical. Estos subdrenes se construirán con tubería p.v.c. y se forrarán con tela geotextil tipo NT 2500 o similar.



13.2.1 Pilas correspondientes a la cimentación de los muros.

Cálculo de capacidad de carga vertical y asentamientos

Para el análisis de la capacidad de carga vertical y estimación de asentamientos se utilizó el software Allpile de Civiltech fundamentado en los procedimientos descritos en “The Foundations & Earth Structures, Design Manual 7.02”, publicados por el Department of Navy, Naval Facilities Engineering Command.

Para el cálculo del asentamiento de los pilotes individuales se utilizan el método semiempíricos propuestos por Vesic (1977)

El asentamiento de un pilote está constituido por la suma de tres componentes

S_t =asentamiento total de un pilote

S_s = asentamiento debido a la deformación axial del fuste del pilote

S_p =asentamiento de la base o la punta del pilote

S_{ps} = asentamiento del pilote causado por la carga transmitida a través del fuste del pilote.

Estas tres componentes se determinan separadamente y se adicionan al mismo tiempo.

$$S_t = S_s + S_p + S_{ps}$$

Utilizando el software All Pile, mencionado anteriormente y considerando un factor de seguridad de 3.0 para la capacidad por punta, 2.0 para la capacidad por fricción y 2.0 para la resistencia al levantamiento, se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 29):

Muro 1 (superior) perfil 1

Tabla 29 Capacidad de carga vertical, resistencia al levantamiento y asentamientos pilas de fundación muro de contención.

Long pila (m)	Diámetro (m)	Espaciamiento (m)	Capacidad carga vertical admisible (Ton)	Resistencia al levantamiento (Ton)	Asentamiento (cm)
20	1.5	3.0	3949	200	0.00608

En la Figura 86 y Figura 87 se presenta la variación de la capacidad de carga vertical y resistencia al levantamiento con la profundidad. Así mismo, se presentan los asentamientos esperados Vs la carga vertical, estimados mediante el software Allpile que utiliza la metodología descrita anteriormente.

ALLOWABLE CAPACITY vs FOUNDATION DEPTH

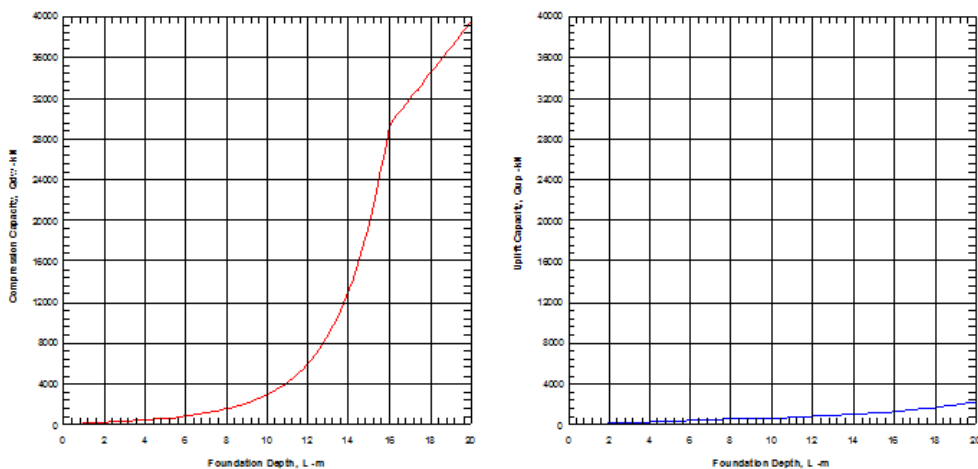


Figura 86. Capacidad de carga vertical y resistencia al levantamiento Muro superior Perfil 1.

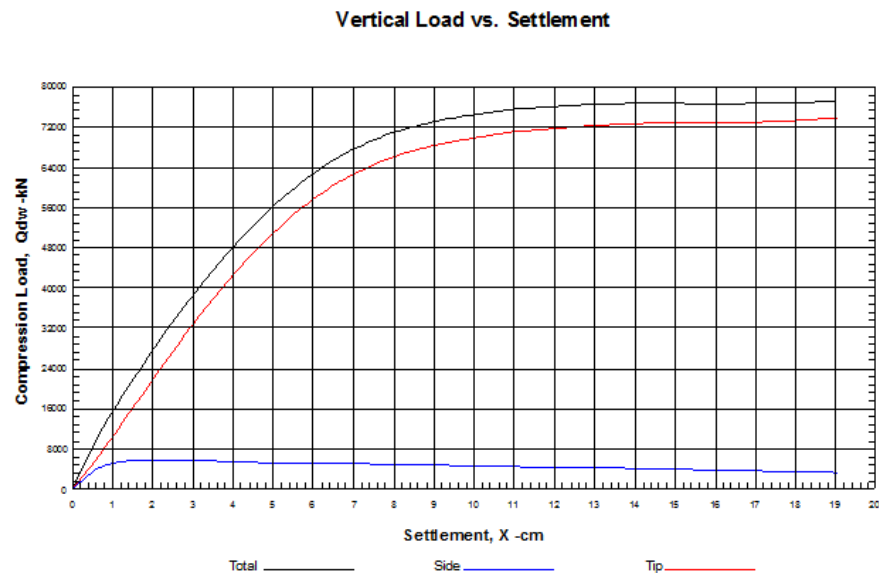


Figura 87. Asentamientos estimados Pilas muro superior perfil 1

Muro inferior perfil 1

A continuación, se presentan los parámetros de capacidad de carga y asentamientos para las pilas de fundación (Tabla 30).

Tabla 30 Capacidad de carga vertical y asentamientos pilas de fundación muro de contención.

Long pila (m)	Diámetro (m)	Espaciamiento (m)	Capacidad carga vertical admisible (Ton)	Resistencia al levantamiento (Ton)	Asentamiento (cm)
12	1.5	3.0	2280	100	0.0067

En la Figura 88 y Figura 89 se presenta la variación de la capacidad de carga vertical y resistencia al levantamiento con la profundidad. Así mismo, se presentan los asentamientos esperados Vs la carga vertical, estimados mediante el software Allpile que utiliza la metodología descrita anteriormente.

ALLOWABLE CAPACITY vs FOUNDATION DEPTH

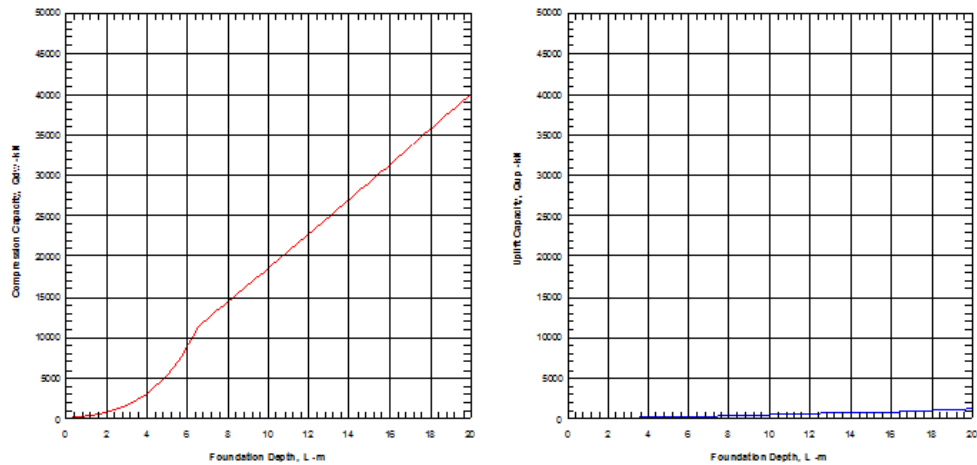


Figura 88. Capacidad de carga vertical y resistencia al levantamiento Muro inferior Perfil 1.

Vertical Load vs. Settlement

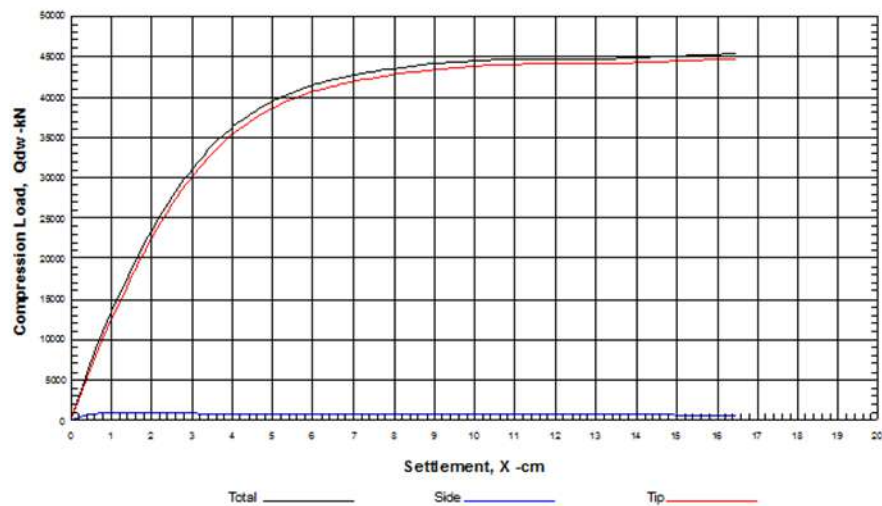


Figura 89. Asentamientos estimados Pilas muro inferior perfil 1

Análisis lateral

Para analizar las diferentes estructuras que se proponen y realizar el análisis de deformaciones, momentos, fuerza de cortante y presión lateral del sistema suelo-pila, se utilizó el programa Allpile Versión 6.5 de Civiltech el cual se basa en un modelo elástico mediante la solución de la ecuación diferencial mostrada a continuación:

$$EI \frac{d^4 Y}{dZ^4} + Q \frac{d^2 Y}{dZ^2} - R - P_q = 0$$

Where Q = axial compression load on the pile

Y = lateral deflection of pile at depth of Z

Z = depth from top of pile

R = soil reaction per unit length

E = modules of elasticity of pile

I = moment of inertia of the pile

P_q = distributed load along the length of pile

$$EI \left(\frac{d^3 Y}{dZ^3} \right) + Q \left(\frac{dY}{dZ} \right) = P$$

Where P = shear in the pile

Where M = bending moment of the pile

$$\frac{dY}{dZ} = S,$$

$$EI \left(\frac{d^2 Y}{dZ^2} \right) = M$$

Las cargas y fuerzas que actuarán sobre la estructura y que se utilizarán en el software fueron estimadas con base en el modelo geológico-geotécnico mostrado anteriormente y considerando empujes para el estado de reposo. El punto de análisis corresponde a la cabeza de las pilas, que coincide con la superficie de falla, con lo cual se analiza el empotramiento requerido para garantizar la estabilidad del sistema. La longitud total de las pilas debe incluir la profundidad de empotramiento y la longitud por encima de la superficie de falla.

Las cargas o fuerzas que actuarán sobre las fundaciones se muestran a continuación:

Tabla 31 Cargas estimadas para los diferentes casos analizados

Parámetro	Muro superior Perfil 1	Muro inferior Perfil 1
Espaciamiento (m)	3.0	3.0
P (Ton)	25	25
Q (Ton)	10	10

Donde:

P= fuerza horizontal aplicada

Q= Carga vertical aplicada

Resultados

Muro superior Perfil 1

A continuación, se presentan los resultados para el muro superior del perfil 1 (Tabla 32 y Figura 90).

Tabla 32 Resultados Obtenidos Interacción suelo-estructura

Descripción	Valor
Longitud de pila (m)	20
Deflexión en la cabeza (cm)	3.6
Momento máximo (kN-m)	1240
Cortante máximo (KN)	250
Presión lateral máxima (KN/m2))	45

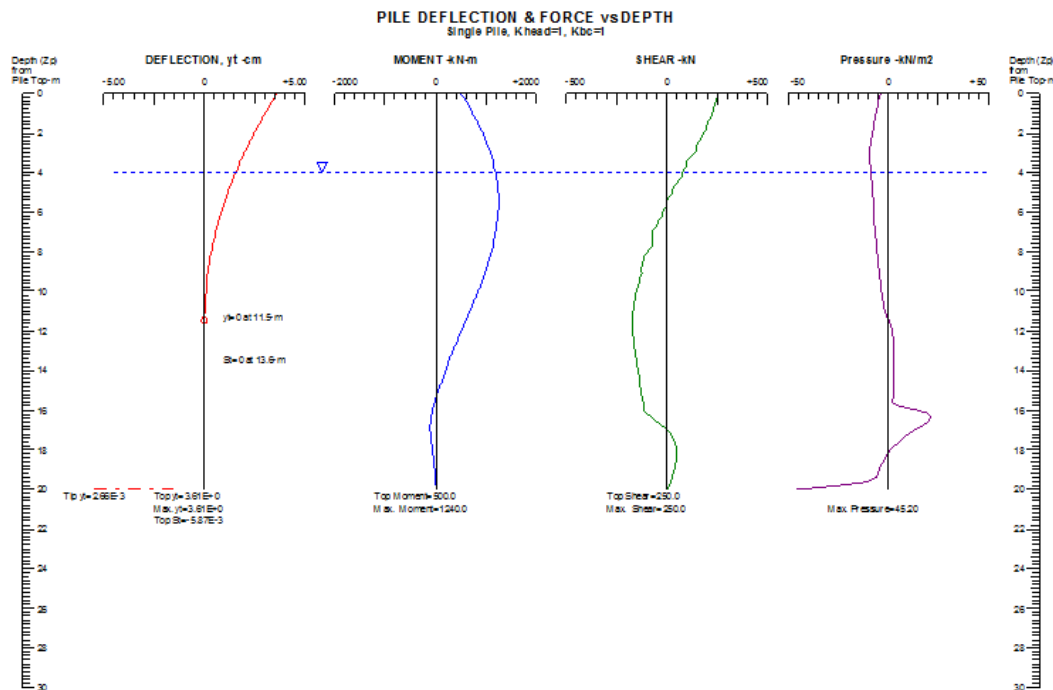


Figura 90. Análisis lateral de las pilas Muro superior Perfil 1.

Muro inferior Perfil 1

A continuación, se presentan los resultados para el muro inferior del perfil 1 (Tabla 33 y Figura 91).

Tabla 33 Resultados Obtenidos Interacción suelo-estructura

Descripción	Valor
Longitud de pila (m)	12
Deflexión en la cabeza (cm)	2.1
Momento máximo (kN-m)	1350
Cortante máximo (KN)	458
Presión lateral máxima (KN/m2)	82

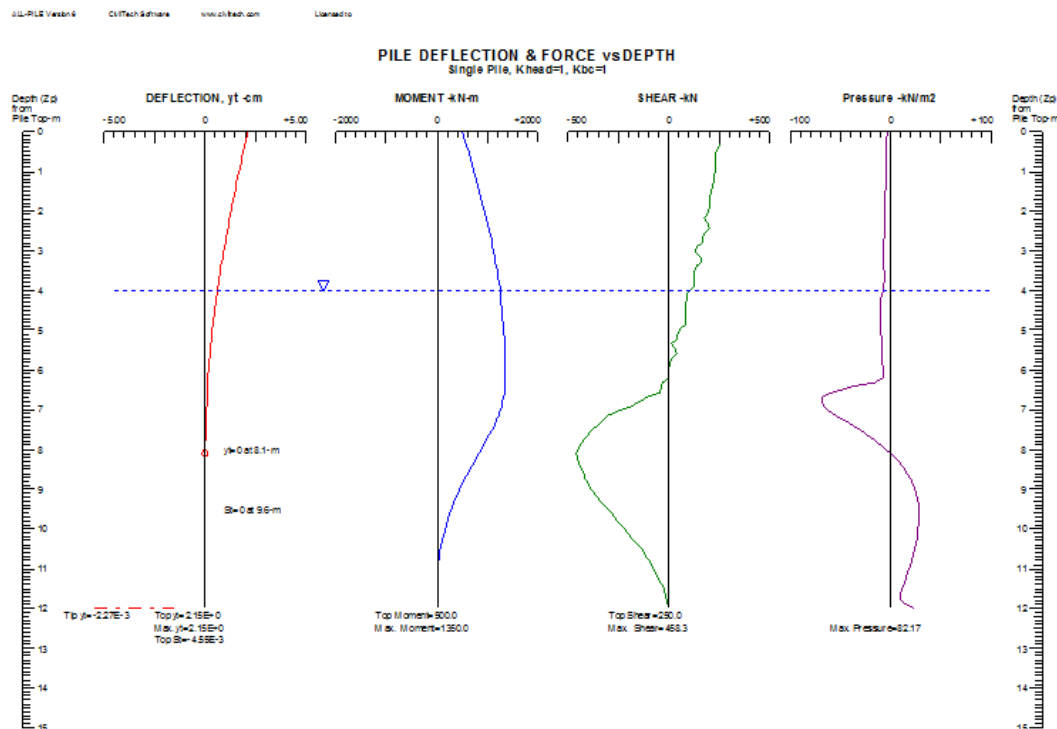


Figura 91. Análisis capacidad lateral de las pilas Muro inferior Perfil 1.

13.2.2 Plan de Seguimiento y Monitoreo

Para el polígono Betania se propone instalar un inclinómetro y un piezómetro en la parte superior del perfil 1 cota 1687. Igualmente, para el perfil 2 un inclinómetro y un piezómetro en la cota 1680.

El tubo correspondiente al inclinómetro se debe alinear de tal manera que un par de ranuras se encuentren alineadas en la dirección anticipada del movimiento. La

ranura que se encuentra, en dirección ladera abajo, se marca como A0 y la ranura opuesta, se marca como A180. Las otras dos ranuras se marcan como B0 y B180.

Se recomienda colocar en la cabeza del inclinómetro una caja o protector metálico para preservarlo de actos vandálicos.

La lectura de inicio o lectura base se podrá realizar una vez haya fraguado el concreto y a partir de esta lectura se recomienda realizar lecturas mensuales durante un año, que iniciarán una vez se encuentre construida el muro de contención.

13.3 RECOMENDACIONES PARTICULARES EXCAVACION DE PILAS

Al iniciar una excavación en el terreno, se producen alteraciones en las tensiones normales del mismo, rompiendo el equilibrio que existe, aunque el terreno normalmente reestablece este equilibrio en ocasiones se producen deslizamientos de las paredes que afectan la estabilidad de esta sección de la obra, por lo que se deben seguir ciertas recomendaciones que minimicen la posible ocurrencia de estos eventos:

- Se deberá evitar la acumulación de materiales en los bordes de las excavaciones a fin de prevenir deslizamientos por causa de sobrecargas en la sección de corte, según la experiencia es recomendable que la distancia mínima libre de material acumulado sea igual o mayor a la profundidad excavada.
- Se recomienda cuidar el paso de maquinaria cerca al borde de la excavación con el fin de evitar posibles sobrecargas dinámicas que provoquen afectaciones negativas a la excavación
- Se recomienda que los cortes realizados no se dejen expuestos un periodo prolongado de tiempo, realizando las actividades de excavación y construcción con una secuencia lo más inmediata posible, evitando así remoldeo en el material (suelo) de cimentación.
- En todos los casos es necesario que el fondo de la excavación, conocida como la profundidad de desplante se encuentre libre de cualquier objeto extraño o material suelto, por lo que se recomienda una limpieza de las superficies que garantice superficies libres de material removido evitando así la posible ocurrencia de asentamientos considerables del elemento de cimentación.
- En caso de que el nivel al cual se proyectó el desplante de la cimentación posea un material diferente al especificado en el informe, el paso a seguir será continuar

la excavación hasta encontrarse, rellenando el volumen sobre-excavado con concreto ciclópeo.

- Antes de vaciar las cimentaciones, se deberá limpiar todo el material del fondo de la excavación, con el fin de evitar que estos materiales puedan ocasionar asentamientos considerables a la estructura.
- Durante la etapa de construcción se recomienda llevar un control de los asentamientos y deformaciones cuyo objetivo estará ligado a controlar y verificar la magnitud de estos respecto a los esperados o permisibles dentro del cálculo de la cimentación.
- Se recomienda entibar toda la longitud de la pila utilizando anillos de concreto, para evitar deterioro del terreno y garantizar la seguridad del personal que labora en ellas (Figura 92).



Figura 92. Construcción de una pila in-situ.

- Se recomienda tener un estricto control de las aguas de escorrentía y aguas lluvias que tengan influencia en el lugar de construcción pues la ausencia de este hará que el flujo no controlado se desplace por las superficies pudiendo tener una afectación negativa en las propiedades de los materiales y generando eventos de inestabilidad en excavaciones y superficies de terreno.

13.3.1 Viviendas afectadas por obras propuestas

Para la localización de las obras de estabilización propuestas para el polígono de Betania, se presenta afectación en un total de 8 edificaciones, de las cuales las primeras 2 de ellas se localizan en los subdrenes y las 6 edificaciones restantes se ubican sobre el lleno que debe retirarse. A continuación, se relacionan las viviendas afectadas para el polígono:

Tabla 34. Viviendas afectadas por obras en el polígono Betania

OBRA	COBAMA	DIRECCIÓN	NIVELES
Subdren	13120050013001	Calle 34 # 107 - 59 interior 206	2
Subdren	13120050043001	Calle 34 # 107 - 59 interior 107	3
Retiro de lleno antrópico	13120050043002	Cl34#107-59	3
Retiro de lleno antrópico	13120050014001	Cl34#107-59int103	2
Retiro de lleno antrópico	13120050032001	Carrera 107 # 33 b - 59 interior 201	3
Retiro de lleno antrópico	13120050033001	Cr107#33-55	2
Retiro de lleno antrópico	13120050034001	Carrera 107 # 33 b - 54	2
Retiro de lleno antrópico	13120050035001	Cra 107#33B-43	1

13.4 RECOMENDACIONES GENERALES

En terrenos inclinados la fuerza de gravedad juega un importante papel en la formación de inestabilidades pues existe un componente sobre la masa de suelo que induce a que una masa se deslice a lo largo de una superficie de falla, una vez se supera la resistencia al cortante de dicho material. Para que esto suceda existen una serie de factores que coadyuvan a que se disminuyan las propiedades de resistencia de los suelos tales como incremento de los niveles de humedad – saturación, inclinación o pendiente de los terrenos, modificaciones antrópicas entre otras.

Con el fin de mitigar las inestabilidades generadas o prevenir la ocurrencia de estas, se presentan a continuación una serie de medidas que deben tenerse en cuenta en los procesos de intervención de un terreno. Las medidas se plantean como obras de mitigación y/o control hacia dos aspectos fundamentales: Las modificaciones del terreno por factores antrópicos y el control de las aguas, que constituyen la principal causa de la formación de inestabilidades en nuestro medio.

Para la construcción de viviendas nuevas, legalización de las existentes y desarrollo de obras de infraestructura, se deben realizar los estudios geotécnicos o de suelos puntuales, de conformidad con la NSR-10, y el Acuerdo Metropolitano 09 de 2012. Dichos estudios deberán ser aprobados en las curadurías urbanas.

13.4.1 Modificaciones del terreno

La creciente demanda por terrenos para construir viviendas ha hecho que se ocupen terrenos de altas pendientes y pobres propiedades geotécnicas, mediante emplazamientos logrados a través de cortes de las laderas que deterioran la estabilidad precaria de por sí, de las mismas.

Con el fin de prevenir inestabilidades en las zonas de alta pendiente, es necesario incluir en las prácticas de construcción algunas recomendaciones que pretenden disminuir la probabilidad de que ocurran movimientos en masa que pueden tener graves consecuencias en los aspectos económicos y sociales

Es necesario que la comunidad que interviene las laderas que conforman las vertientes de las diferentes quebradas, conserven el retiro mínimo establecido en el POT de la ciudad, con el fin de prevenir emergencias asociadas a las crecientes o avenidas torrenciales como a la posibilidad de ser afectados por movimientos en masa.

En primer lugar, se recomienda que los cortes de la ladera que se realizan entre viviendas adyacentes no deben superar 3 m de altura y es necesario mantener un retiro mínimo de las zonas de taludes para el establecimiento de la vivienda, dejando un retiro tanto en la parte superior del talud como en la parte inferior del mismo, no menos de 2/3 de la altura antes mencionada, como se muestra en la Figura 93.

En el caso de existir taludes con mayores alturas a la mencionada se deberán construir estructuras de contención que permitan garantizar la estabilidad de esta.

Estas estructuras deberán cimentarse adecuadamente sobrepasando materiales de lleno y empotrándose en terrenos aptos para tal fin.

Para el caso de terrenos con predominio de materiales limo arcillosos o arcillosos, se podrán conformar taludes hasta la altura recomendada anteriormente con inclinación que mantenga una relación de corte de 0.5H:1V (62°). En el caso de materiales limosos o arenosos, la inclinación o pendiente del talud generado no debe exceder de 1H:1V.

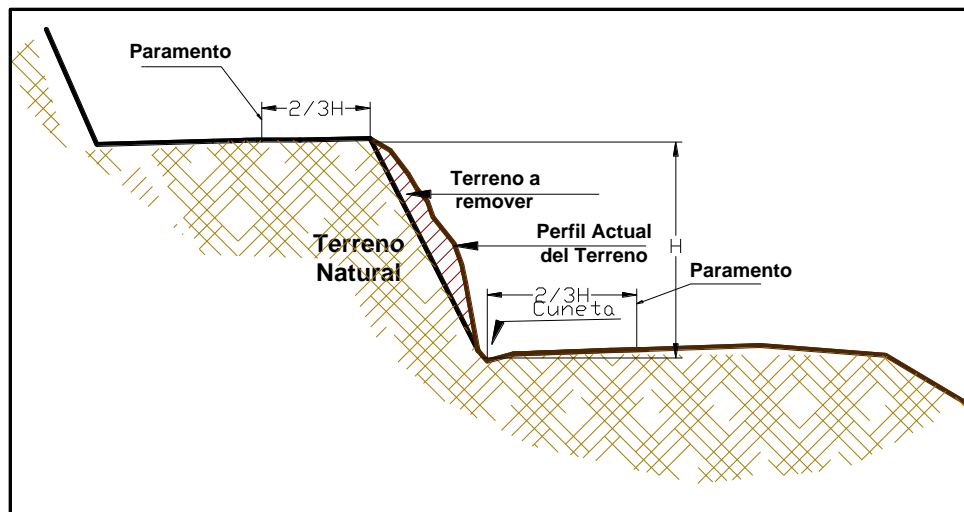


Figura 93. Recomendaciones para modificaciones del talud e implantación de viviendas.

En sectores en donde se detecte la presencia de agrietamientos en el terreno o deformaciones en el talud que amenacen el sector, deben intervenirse estos taludes retirando el material inestable y conformando las pendientes anteriormente recomendadas, de acuerdo con el tipo de material que conforma el talud (Figura 94). Esta intervención debe realizarse con medios manuales y con la orientación de personal calificado, además de tener las respectivas medidas de seguridad para el personal que labore allí.

Si el talud a intervenir presenta suelos limo arcillosos o arcillosos se podrá cubrir el área afectada o intervenida con cespiones de grama o en su defecto se podrán utilizar productos sintéticos (biomantos, agromantos, etc) mezclados con semillas de pastos que permitan el establecimiento de la cobertura en el menor tiempo posible

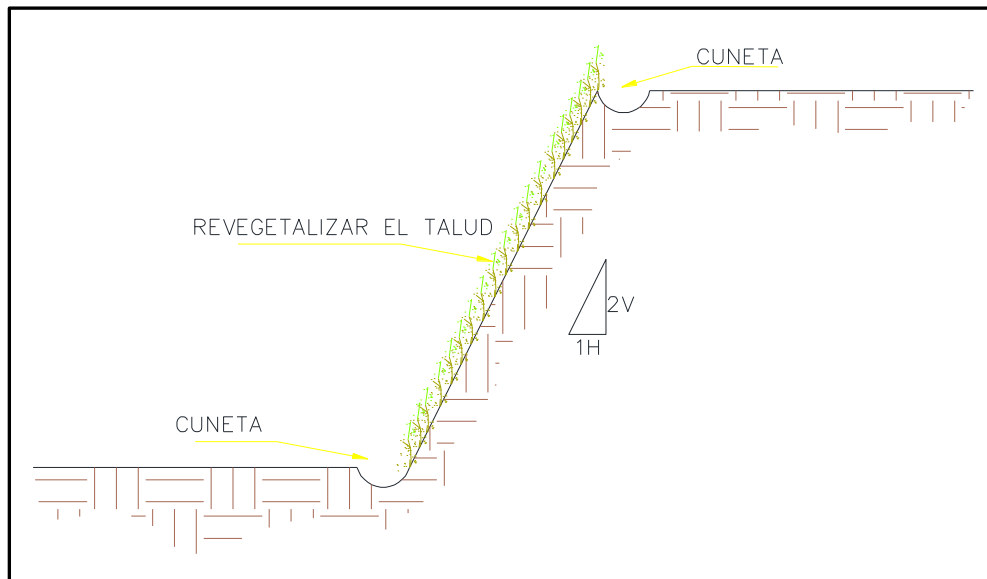


Figura 94. Esquema de recomendaciones para taludes

Si los materiales que conforman el talud son limosos o arenosos, se recomienda el cubrimiento de la zona expuesta mediante la utilización de malla de gallinero y mortero. La malla debe anclarse al talud utilizando pernos de acero, que deberán tener longitudes no inferiores a 0.50 m. Sobre la malla se colocará un mortero de arena-cemento en un espesor no inferior a 5 cm. se deberán dejar oídos o lloraderos para permitir el drenaje de aguas infiltradas detrás de la piel o placa. Estos lloraderos se construirán con trozos de tubería pvc sanitaria de 2 pulgadas de diámetro de 40 cm de longitud, que atravesarán la cubierta y se dejará 5 cm por fuera de la misma. Se deberá garantizar una pendiente del 5% con respecto a la horizontal.

En sectores donde se presenten grietas de tensión, se deberá inicialmente rellenarlas y sellarlas utilizando el siguiente procedimiento:

En primer lugar, se debe preparar una lechada de agua-cal lo suficientemente fluida para que percole por la grieta y descienda la mayor profundidad posible. Una vez hecho esto, se excavará a lado y lado de la grieta en un ancho máximo de 10 cm, y hasta una profundidad no inferior a 0.50 m, donde se colocará una mezcla de suelo y cal en proporción de 8:1, la cual colocará en capas de no más de 0.20 m y se compactará utilizando piones manuales, hasta alcanzar la superficie del terreno. Se deberá mantener la vigilancia sobre estos terrenos y en caso de que se

presenten nuevos agrietamientos, se deberá evaluar la posibilidad de intervenir el talud reconfigurándolo con las inclinaciones anteriormente mencionadas.

13.4.2 Control de drenaje

El agua constituye un factor determinante en la formación de inestabilidades de terrenos inclinados, pues causan deterioro de las propiedades que gobiernan la resistencia de los suelos que conforman los taludes. Por lo anterior, es preciso mantener el control estricto sobre las aguas lluvias y de escorrentía para prevenir o mitigar efectos adversos sobre la estabilidad de taludes y laderas. Para lograr el fin antes mencionado, se presentan algunas recomendaciones generales que buscan el control de las aguas y por ende mantener condiciones de estabilidad adecuadas.

Cunetas y rondas de coronación

Es necesario que, en sectores con áreas aferentes importantes, se construya una cuneta o ronda de coronación que intercepte las aguas de escorrentía que puedan afectar el talud objeto de intervención. Estas cunetas o rondas deben construirse por detrás de la corona de este, a una distancia mínima de 1.0 m. Estos elementos deberán tener una pendiente no inferior al 2% y no superior al 5% y deberán entregarse a drenajes naturales o a la red de aguas lluvias. Estas cunetas se podrán construir con sacos de suelo-cemento o con concreto simple, como se muestra en la Figura 95.

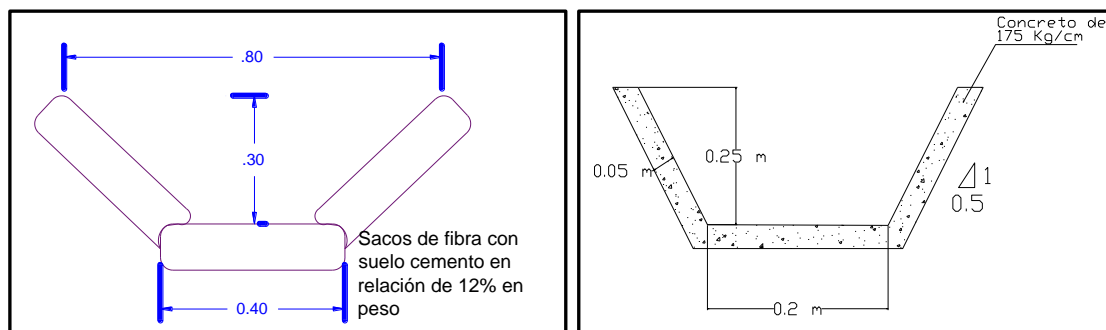


Figura 95. Características de las cunetas

En la parte inferior del talud (pie o pata del talud) se deberá construir una cuneta que permita captar y conducir las aguas de escorrentía que fluyan por el talud, de tal manera que se evite la infiltración o la formación de procesos erosivos.

Las cunetas recomendadas podrán construirse en concreto y debajo de la misma, se deberá colocar un entresuelo en piedra y arena con espesor no inferior a 10 cm

(Figura 96). Las especificaciones de pendiente y entrega serán las recomendadas anteriormente para las rondas de coronación. Estas cunetas deberán llevar las aguas hacia la red de aguas lluvias de la zona o hacia los drenajes naturales. Se debe verificar que la entrega se haga de manera adecuada, evitando la formación de procesos erosivos.

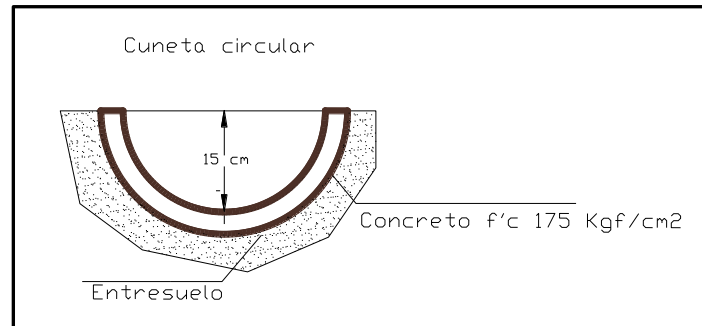


Figura 96. Forma de construcción de las cunetas propuestas

Captación y conducción de aguas lluvias en viviendas

Cada vivienda debe implementar un sistema de captación y conducción de aguas lluvias mediante canoas que recojan las aguas de los techos y las conduzcan por medio de bajantes a la red de aguas lluvias del sector o en su defecto a tanques de almacenamiento para ser aprovechadas en labores de limpieza (Figura 97).

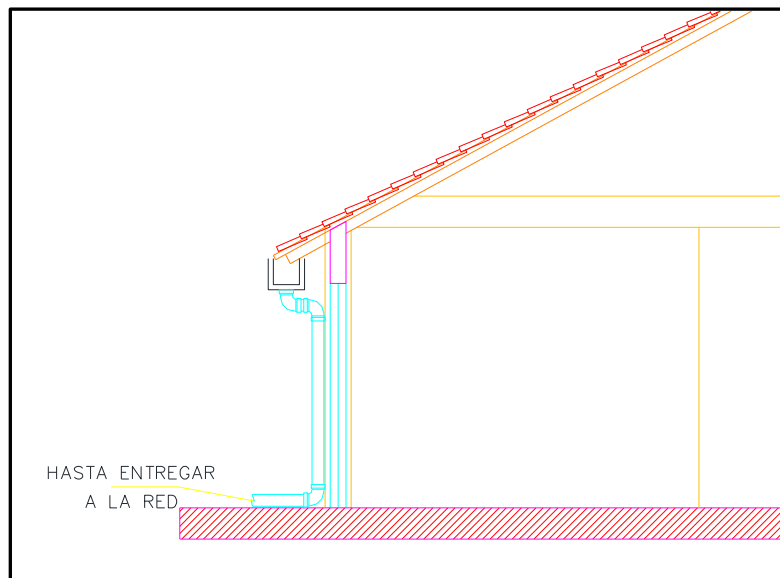


Figura 97. Esquema de bajantes

Las redes de acueducto y alcantarillado de cada vivienda deben construirse en tuberías de p.v.c que permitan cierta flexibilidad y eviten el rompimiento o deterioro ante pequeños movimientos o desplazamientos del terreno. Debe realizarse periódicamente evaluaciones del estado de las redes con el fin verificar su adecuado comportamiento y/o la necesidad de reemplazar alguna de ellas.

Es necesario que al interior y/o exterior de cada vivienda se verifique que no existen zonas de empozamiento y que las aguas lluvias y de escorrentía fluyen adecuadamente hacia las obras de drenaje o hacia los drenajes naturales.

Drenaje en vías y senderos

Se debe implementar o mejorar el sistema de drenaje en calles y senderos mediante la construcción o adecuación de cunetas y canales que permitan captar y conducir adecuadamente las aguas lluvias y de escorrentía hacia la red de aguas lluvias o drenajes naturales. Para lo anterior, durante el programa de intervención se definirán los trazados de las redes de cunetas, ajustándose a las condiciones de espacio, pendiente y caudal o se reemplazarán las que se requieran por su estado o por su capacidad.

Estos sistemas de captación de aguas lluvias deberán estar provistos de estructuras de disipación para atravesar terrenos de muy alta pendiente, sin que se afecte el flujo normal de las aguas.

Tanto las redes de acueducto como alcantarillado deben ubicarse sobre terrenos estables. En sectores que muestren alguna actividad inestable, deberán colocarse superficialmente para mantener vigilancia sobre las mismas.

Deberá procurarse la construcción de sumideros en calles y senderos para captar las aguas lluvias y escorrentías que fluyen por los mismos y conducirlos adecuadamente hacia la red de aguas lluvias o drenajes naturales.

Obras de drenaje complementarias

Todas las obras de ingeniería que se recomiendan para mejorar la estabilidad tales como muros, pantallas ancladas, pantalla de pilas etc, deberán complementarse con obras de drenaje que eviten el deterioro o la falla de estas. En este orden se deberán construir cunetas, filtros y drenes horizontales que mantengan controlado las aguas lluvias, de escorrentía y el nivel freático en los sectores intervenidos.

Drenes horizontales o de penetración.

Los drenes subhorizontales consisten en introducir una tubería de p.v.c con una leve pendiente al terreno para abatir o controlar el nivel freático y mantener las condiciones de estabilidad del sector. Los drenes se construirán en tubería de p.v.c sanitaria de 2 pulgadas de diámetro, ranurada o perforada y se forrará con tela de geotextil no tejido tipo NT 2500 o similar. La inclinación de los drenes será de 4 a 6° con respecto a la horizontal. El espaciamiento tanto vertical como horizontal se especifica en cada uno de los planos constructivos.

Se dejará un tramo de tubería de 10 a 15 cm por fuera del talud y se conectará con manguera flexible para conducir las aguas captadas hacia una cuneta, la red de aguas lluvias o hacia un drenaje natural.

Filtros detrás de muros

Detrás de las estructuras de contención es obligatorio la construcción de filtros para el control de las aguas infiltradas. Los filtros detrás de estructuras se podrán construir con material granular limpio envuelto en geotextil no tejido con un ancho mínimo de 0.50 m y con altura de 2/3 partes de la altura del muro. La parte restante hasta llegar a la corona del muro se hará con material de lleno convencional. En la parte inferior del filtro se colocará una tubería perforada de 4 pulgadas, que se conectará a la red de aguas lluvias o a un drenaje del sector.

En la Figura 98 se presentan los detalles para el filtro detrás de estructuras.

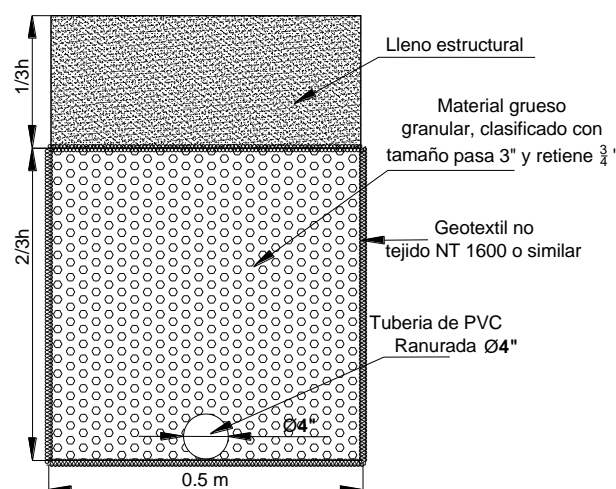


Figura 98. Características de los filtros propuestos

Es conveniente que en la pantalla del muro de contención se construyan oídos o lloraderos que faciliten la evacuación de excesos de agua para evitar presiones adicionales sobre la estructura. Estos oídos se conforman dejando embebido en el concreto la tubería de p.v.c de 2 pulgadas que atraviesan la pantalla de concreto.

- Previo al desarrollo de anclajes o drenes se deberá consultar ante la empresa prestadora de servicios públicos si existen redes que puedan resultar afectadas, además se deberá tener en cuenta el artículo 557 del Acuerdo 48 de 2014: “Criterios de seguridad que deben tener las obras geotécnicas que se realicen en el municipio de Medellín. Previo a la ejecución de obras geotécnicas que tengan prevista la realización de anclajes o subdrenes que traspasen a predios colindantes en proyectos urbanísticos, será necesario la constitución de servidumbre por los propietarios de los mismos, junto con un escrito de responsabilidad, suscrita por parte del constructor del proyecto o responsable de la obra geotécnica, que incluya la obligación de salvaguardar la integridad de las edificaciones, espacio público y las redes de líneas vitales vecinas. En el caso de no ser factible la localización de estas obras geotécnicas sobre predios vecinos, el responsable del proyecto deberá generar otra alternativa de obra geotécnica, que permita garantizar la estabilidad del terreno donde se proyecta la obra, de los predios y edificaciones colindantes”.
- Cuando las obras de mitigación generen espacios residuales potencialmente aprovechables, se recomienda que éstos se adecúen como espacios públicos (zonas verdes, recreación pasiva, senderos, entre otros) para evitar la ocupación indebida (invasión) de los mismos.
- Previo a la ejecución de las obras de mitigación recomendadas para cada área de estudio, se debe verificar si las condiciones iniciales (geológicas, geomorfológicas, hidrológicas y geotécnicas) se mantienen, de lo contrario se tendría que realizar una actualización a los estudios y diseños de las mismas.
- Previo a la construcción de las obras de mitigación, se debe verificar si los predios a intervenir son de propiedad del municipio de Medellín, en caso contrario se deberán solicitar los respectivos permisos o proceder a realizar la compra de estos. Igualmente, las edificaciones afectadas por el desarrollo de las obras, deben ser compradas o reubicadas.

- Cuando las obras de mitigación recomendadas obedecen a causas generadas durante el desarrollo de un proceso constructivo, están deberán ser ejecutadas por la firma o empresa constructora responsable de dicho proyecto.
- Si con el desarrollo de las obras de mitigación se generan descoles, producto del manejo de las aguas superficiales y subsuperficiales, estos deberán ser conducidos a una red de drenaje natural o artificial, previo trámite ante las entidades competentes.
- Las áreas de amenaza o riesgo medio y bajo, producto de un estudio de amenaza o riesgo de detalle, podrán ser objeto de otorgamiento de reconocimientos o licencias urbanísticas, prestación de servicios públicos cumpliendo con las normas establecidas en el Acuerdo 48 de 2014 y las disposiciones determinadas en la Norma NRS-10, el Acuerdo Metropolitano 09 de 2012 o demás normas que las adicionen, modifiquen o sustituyan.
- El plan de monitoreo para hacer seguimiento al comportamiento de las obras de mitigación en el tiempo, deberá desarrollarse conforme se plantea en las recomendaciones de este estudio, en relación a la localización y profundidad de la instrumentación, la duración total del proceso y la periodicidad de las lecturas.

13.5 RECOMENDACIONES VULNERABILIDAD.

13.5.1 Servicios públicos domiciliarios

Consolidar la construcción de redes locales de acueducto, redes locales de alcantarillado de aguas servidas y lluvias en todo el polígono.

En el polígono estudiado se localizan 2 construcciones que presentan operador de acueducto no formalizado (comunal o conexiones erradas), para las cuales, se recomienda tramitar la conexión y legalización de este sistema ante la entidad prestadora del servicio, EPM. Igualmente 2 edificaciones presentan como tipo de descarga en talud y sistema no convencional, por lo tanto, se recomienda la conexión de dichos predios a la red de alcantarillado existente.

Finalmente, se localizan 22 construcciones que no cuentan con sistema de recolección de aguas lluvia, arrojando libremente dichas aguas al terreno, lo que puede ocasionar la erosión, infiltración y humedades de las estructuras y taludes colindantes, por ende, se sugiere la adecuación de cubiertas y bajantes para la captación y conducción a la red de EPM.

13.5.2 Líneas vitales – energía y alumbrado público

En el polígono Betania de los 25 postes de energía con lo que cuenta esta zona, se encontraron 9 postes que presentaron algún tipo de deficiencia, sea inclinación o fisuras, por lo tanto, se recomienda el reemplazo de estos, en especial a los que se les identifica madera como material de composición.

13.5.3 Vías de acceso y obras de drenaje

Se deben construir cunetas, sumideros y obras transversales en vías vehiculares, andenes o senderos peatonales.

13.5.4 Mejoramiento saludable

Este tipo de mejoramiento consiste en implementar obras menores, que tienen como finalidad mantener el inmueble en las debidas condiciones de higiene y ornato sin afectar su estructura portante, su distribución interior, sus características funcionales, formales y/o volumétrica, para las cuales no se requerirán licencias de construcción en los términos del artículo 10 del decreto Nacional 1469 de 2010 o a las normas que lo adicionen, modifiquen o sustituyan. Se otorga para corregir: habilitación o instalación de baños, lavadero, cocinas, redes hidráulicas y sanitarias, cubiertas parciales, pisos, enchapes, instalaciones eléctricas etc.

En el polígono Betania se identificaron 8 construcciones que representan las estructuras con tipologías (D), (C) y (B) que aplican a este tipo de mejoramiento.

13.5.5 Mejoramiento locativo

Mejoramiento estructural que se aplica, cuando supera una o varias deficiencias básicas perteneciente a un desarrollo legal o en proceso de legalización, para los cuales es necesario la consecución de permisos o licencias previas ante las autoridades competentes, dichas mejoras pueden consistir en: defectos de la cimentación, vigas, columnas, losas, muros, reforzamiento estructural para actualizarse a la Norma Sismo Resistente NSR-10.

La solución a las deficiencias constructivas que este tipo de mejoramiento pueden aportar serian:

- Tratamiento de grietas.
- Consolidación de ladrillos con proceso degradatorio incipiente.

- Cambio de chapas en los ladrillos con procesos degradatorios avanzados, en los cuales se haya presentado pérdida de volumen.
- Recuperación de morteros de pega.
- Mantenimiento y reposición de cubiertas, impermeabilización con productos epóxidos.
- Construcción de filtros perimetrales para recolección de aguas subterráneas
- Construcción de Sistemas de fundación y sistemas estructurales que brinden un confinamiento y otorgue estabilidad a las edificaciones, haciendo una rehabilitación sísmica o actualización a la Norma vigente, mediante un reforzamiento estructural.

Dicho tipo de mejoramiento es aplicable a 42 construcciones encontradas con tipología E, es decir, estructuras ligeras que son todas aquellas edificaciones construidas con materiales tradicionales o de baja calidad, con un sistema estructural de muros cargueros.

Adicionalmente en el polígono Betania se encontró 1 construcción con tipología estructural “Construcciones Simple (F)”, es decir, aquellas edificaciones que no poseen una estructura definida y que generalmente son de carácter improvisado y construidas con materiales precarios o de recuperación, a las cuales se les recomienda realizar una intervención integral, dentro de los cuales se considera la reposición.

13.6 OTRAS RECOMENDACIONES

- Las estructuras de contención no están diseñadas para soportar cargas adicionales de construcciones por lo cual debe prohibirse su desarrollo sobre este tipo de obras.
- Se recomienda restringir la realización de huertas en zonas de pendientes mayores al 40%, o en zonas de antiguos movimientos en masa.
- Se recomienda restringir la realización de escombreras y botaderos de basuras en las zonas denominadas como de amenaza alta y media por movimientos en masa.
- El cambio en las restricciones de uso del suelo para el polígono en estudio, están sujetas a la ejecución de las obras planteadas y su monitoreo, hasta que se garantice la estabilidad de la zona.
- Para la construcción de viviendas nuevas y obras de infraestructura se deben realizar los estudios de suelos ajustados a la Norma sismo resistente NSR-10,

para definir las condiciones de estabilidad puntuales, estos estudios deben ser aprobados en curaduría de acuerdo a la normatividad vigente.

- Se recomienda realizar mantenimiento a las diferentes obras proyectadas, el cual incluye:
 - Mantenimiento rutinario, es aquel que puede realizarlo un grupo de personas no calificadas y que comprende labores básicas como limpieza de cunetas y rondas, también el retiro de escombros. Debe realizarse con la siguiente periodicidad: dos veces al mes, antes y después de una temporada invernal y cuando ocurra un evento que así lo requiera.
 - Mantenimiento periódico, es aquel que un grupo de personas calificadas para labores de reparación puede llevar a cabo. Comprende labores de reparaciones menores de estructuras de contención, sistemas de contención y de obras de drenaje. Este mantenimiento se debe realizar con la siguiente periodicidad: dos veces al año y cuando ocurra un evento que así lo requiera.
- Si para la ejecución de las obras geotécnicas se requiere la intervención de los árboles, se recomienda realizar un inventario forestal y tramitar los permisos ambientales ante la autoridad ambiental competente (Área Metropolitana el Valle de Aburrá – Corantioquia).

14.CONCLUSIONES

- Las unidades geológicas que afloran en la zona del proyecto corresponden principalmente al saprolito del Stock de Altavista y a llenos antrópicos, la primera corresponde a la unidad geológica predominante en la zona y que representa el basamento de la mayor parte de la zona estudiada; el lleno más representativo tiene una profundidad de 16 m y corresponde al lugar donde se ubica la cancha polideportiva y el parque infantil del barrio Betania.
- La zona de estudio se caracteriza por tener una topografía dominada por rangos de pendientes muy inclinadas y abruptas en aproximadamente el 70% del área del polígono, la mayor parte de éstas asociado a las vertientes cóncavas y cortas que se extienden a lo largo de toda la zona. Hacia la parte baja del polígono 1312-1 y la parte central del polígono 7003-1 predominan pendientes suaves a muy suaves, asociadas a la formación de llenos antrópicos.
- Dentro del polígono en estudio, los movimientos en masa identificados corresponden principalmente al movimiento del lleno del sector de la placa polideportiva, evidenciado en la deformación del muro de gaviones que sirve de contención, a la cicatriz ubicada en el polígono 1312-1, que corresponde a una ladera cóncava de pendientes fuertes, sobre saprolito del Stock de Altavista.
- En la zona igualmente se identifican intervenciones de tipo antrópico que detonan y aceleran la ocurrencia de movimientos en masa. Las afectaciones identificadas corresponden principalmente a la realización de banqueos para el establecimiento de viviendas, en zonas de pendientes altas sin ningún tipo de especificaciones técnicas, el vertimiento de aguas lluvias y residuales directamente sobre los taludes, en especial en el sector del polígono 1312-1.
- Para el polígono Betania se construyeron dos perfiles topográficos típicos que representan las condiciones morfométricas del sector, en los cuales se plasmó la información estratigráfica y geotécnica, y a partir de los cuales se obtienen la zonificación de amenaza por estabilidad. Para los perfiles 1 y 2, el factor de seguridad bajo la consideración estática fue de 1.35 y 1.00 respectivamente; bajo la influencia del sismo se reducen a 0.90 y 0,68, y considerando un incremento de la saturación, los factores de seguridad obtenidos son de 1.21 y 1.00 respectivamente, clasificándose como de amenaza media y alta respectivamente.

- Para el polígono Betania los análisis del *runout* muestran que los materiales resultantes de deslizamientos que se generan hacia la parte alta del polígono (1312-1) en de las zonas de amenaza alta por estabilidad, favorecido por las pendientes y la diferencia de altura, pueden llegar a depositarse hacia la zona verde ubicada al noroccidente del polígono en inmediaciones de la calle 34.
- En el análisis de riesgo por polígono que parte del análisis de la amenaza y la definición de la profundidad de los movimientos en masa y su velocidad, se determina que solo un sector del polígono 1312-1 se define como de riesgo medio, y en riesgo bajo la zona ubicada sobre la calle 34 en polígono 1312-1 y el sector al occidente de la carrera 106 en el polígono 7003-1.
- Las conclusiones y recomendaciones establecidas en el presente informe se basan en los resultados de un trabajo multidisciplinario que incluye actividades de campo y laboratorio enfocadas en evaluar las condiciones de amenaza, vulnerabilidad y riesgo particulares del polígono en estudio en condiciones actuales por lo que su vigencia es de un plazo máximo de 5 años, siempre y cuando, no se presenten cambios en las condiciones topográficas, hidráulicas o de intervención antrópica.

15. LIMITACIONES

- Las conclusiones y recomendaciones consignadas en este documento se basan en los resultados de las investigaciones de campo y laboratorio que se describen en los capítulos respectivos y en la experiencia de los profesionales que participaron en el estudio.
- Debe tenerse en cuenta que existen condiciones especiales en los diferentes polígonos que impidieron definir con precisión algunos aspectos fundamentales necesarios para los análisis, evaluaciones y recomendaciones requeridos en el proyecto, tales como la ocupación del territorio debido a la alta densidad de construcción, escasez de afloramientos y condiciones topográficas especiales que limitaron la accesibilidad a las zonas de afloramientos.
- Para subsanar las limitaciones mencionadas, se contó con la participación de un grupo de profesionales expertos en dichos temas quienes realizaron un amplio y detallado trabajo de campo ajustándolo de la mejor manera, con la información puntual obtenida de los sondeos.
- Los levantamientos topográficos corresponden en su mayoría a restituciones aerofotogramétricas, con los cuales se evaluaron los perfiles de estabilidad y ubicaron las obras propuestas. Es posible que se requiera precisar la ubicación de las obras con levantamientos en campo de mayor detalle.
- Teniendo en cuenta lo anterior, se recomienda que previo a la ejecución de las obras se deberán realizar el levantamiento topográfico complementario y los sondeos o exploraciones necesarias para ajustar y calibrar los modelos presentados en este documento, dando cumplimiento a los requisitos mínimos establecidos en el Código Colombiano de Puentes (CCP-14) en cuanto a número y profundidad de sondeos. Lo anterior, permitirá validar las hipótesis presentadas, ajustar las mismas o realizar los cambios requeridos a nivel geotécnico y estructural.
- Las recomendaciones planteadas en el documento buscan atender la estabilidad global de las laderas objeto de estudio, preservando y/o mejorando las condiciones geotécnicas actuales; sin embargo, los alcances contractuales no permiten definir obras locales para la atención de cada uno de los procesos

reportados, para los cuales se presentan las recomendaciones de manejo generales en aspectos como cortes, excavaciones, manejo de aguas superficiales y subsuperficiales entre otros.

16. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCALDIA DE MEDELLÍN. 2014. Revisión y ajuste del Plan de Ordenamiento Territorial de Medellín, Acuerdo 48 de 2014.
- ALCALDÍA DE MEDELLÍN. 7 de octubre de 2015. Decreto Municipal 1626 de 2015. Gaceta oficial No. 4347
- ACUERDO METROPOLITANO 09/2012. Directrices y lineamientos para la elaboración de estudios geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, hidráulicos, hidrogeológicos y geotécnicos para intervenciones en zonas de ladera. Universidad Nacional de Colombia, Universidad EAFIT y Universidad de Medellín, Medellín.
- ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ – AMVA. 2007. Microzonificación Sísmica Detallada de los Municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado.
- ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ – AMVA., 2013, Determinación y protección de las potenciales zonas de recarga en el centro y sur del valle de Aburrá, Medellín.
- BIENIAWSKI, Z. T. 1989. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. Wiley-Interscience. pp. 40-47.
- CARDINALI, M., REICHENBACH, P., GUZZETTI, F., ARDIZZONE, F., ANTONINI, G., GALLI, M., CACCIANO, M. 2002. A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2(1/2), 57–72.
- CORREA, A.; MARTENS, U.; RESTREPO, J.J.; ORDÓÑEZ – CARMONA, O.; PIMENTEL, M. 2005. Subdivisión de las metamorfitas básicas de los alrededores de Medellín – cordillera Central de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 29 (112), pp. 325-344.
- DEERE, D.U., PATTON F.D. 1971. Slope stability in residual soils. En Proc., Fourth Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Puerto Rico. Vol. 1, Pág. 87-170.

- DU, J., YIN, K., LACASSE, S. Y NADIM, F. 2013. Quantitative vulnerability estimation of structures for individual landslide: application on the metropolitan area of San Salvador. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 19, 1251-1264.
- FELL, R.; HARTFORD, D. 1997. Landslide risk management, in *Landslide Risk Assessment*, Cruden and Fell (eds.) Balkema, Rotterdam: 51- 109.
- GONZÁLEZ, H.; LONDOÑO, A. 2002. Catálogo de las unidades litoestratigráficas de Colombia. Diorita de Altavista (Stock de Altavista) (K1da) Cordillera Central Departamento de Antioquia. Comisión Estratigráfica de Ingeominas. 22 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (Invías) (octubre de 2006a). Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras. Convenio interadministrativo 058703. Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles. Bogotá: Invías-UNAL.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (Invías) (octubre de 2006b). Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras. Convenio interadministrativo 058703. Manual para la inspección visual de pavimentos rígidos. Invías-UNAL.
- LI, Z., NADIM, F., HUANG, H., UZIELLI, M. Y LACASSE, S. 2010. Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards. *Landslides*, 7(2), 125-134.
- MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL - MAVDT. 2010. NSR-10, Norma Sismo Resistente, R. C. D. C. S. 2010. Bogotá.
- MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. 26 de mayo de 2015. Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio. Decreto Número 1077 de 2015
- ORDOÑEZ, ET AL. 2005. Generalidades del sistema de fallas de Romeral en las cercanías a Medellín

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO –SGC. 2015. Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Bogotá, D.C. 179 p.