

# Estudio de pre-factibilidad y factibilidad para proyectos de vivienda para cinco antiguos espacios territoriales de capacitación y reincorporación ETCR

CONTRATO NO. 752 DE 2020

## INFORME FINAL ANTIGUO ETCR LOS MONOS

Un proyecto de:  
Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio

Ejecutado por:  
Universidad Nacional de Colombia - sede Medellín



5 de abril de 2021

# Estudio de pre-factibilidad y factibilidad para proyectos de vivienda para cinco antiguos espacios territoriales de capacitación y reincorporación ETCR.

**Un proyecto de:**  
Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

Jonathan Tybalt Malagón González  
Ministro

Carlos Alberto Ruiz Martínez  
Viceministro de Vivienda

Felipe Walter Correa  
Director del Sistema Habitacional

## **Equipo apoyo técnico Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio**

Alan Guillermo Asprilla Reyes, Dirección Sistema Habitacional

Maria Alejandra Garcia Montero, Dirección Sistema Habitacional

Andrea Carolina Torres León, Dirección Ssistema Habitacional

Liliana Caicedo Mora, Dirección de Espacio Urbano y Territorial

Mario Helberto Leal Noriega, Dirección de Espacio Urbano y Territorial

## **Autor:**

Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín

Juan Camilo Restrepo Gutiérrez  
Vicerrector

Verónica Catalina Botero Fernandez  
Decana Facultad de Minas

## **Equipo de trabajo:**

Edier V. Aristizábal G., Ingeniero Geólogo, PhD.

Director del Proyecto

*Coordinadores temáticos*

Elizabeth Arboleda Guzmán, Antropóloga, PhD

Edwin Fabián García Aristizábal, Ingeniero Civil, PhD

*Coordinación técnica*

Mariana Vásquez Guarín, Ingeniera Geóloga

*Equipo de profesionales*

Federico José Gómez Cardona, Ingeniero Geólogo

Karolina Naranjo, Ingeniera Geóloga

Juan David Ramirez, Geólogo

Ricardo Jaramillo, Geólogo Jr

Carlos José Gaviria Arbeláez, Ingeniero Civil, MsC

Johnnatan Arley Palacio Cordoba, Ingeniero civil

Juan Carlos Guzmán Martínez, Ingeniero civil

Alejandro García Ramírez, Ingeniero civil

Luis Martínez Hernández, Geógrafo

Maria Clara Castrillón Palacio, Arquitecta

Katlina Guarín, Ingeniera catastral, Esp

Victor Alexander Villa Monsalve, Administrador ambiental, Esp

Juan Guillermo Zuluaga, Arquitecto constructor y Abogado

Lina Maria Posada, Arquitecta, Esp

Ana Yadira Saldarriaga, Abogada, Esp

Maria Isabel Jaramillo, Antropóloga Esp

Yessica Tatiana Soto, Socióloga

Melissa Bolaño, Arquitecta

*Auxiliares de ingeniería*

Mariana Sierra Arboleda, Estudiante auxiliar Ingeniería Geológica

David Ortiz Bermudez, Estudiante auxiliar Ingeniería Geológica

John Kleider Garcia, Estudiante auxiliar Ingeniería Geológica

Emanuel Castillo Cardona, Estudiante auxiliar Ingeniería Geológica

Luis Alfredo Martínez Franco, Estudiante auxiliar Ingeniería Geológica

Daissy Milenys Herrera Posada, Estudiante auxiliar Ingeniería Ambiental

Wilson Arbey Diaz Uruena, Estudiante auxiliar Ingeniería ambiental

# Índice general

<b>1. Generalidades</b>	<b>30</b>
1.1. Objeto . . . . .	30
1.2. Alcances . . . . .	31
1.3. Localización del área de estudio . . . . .	31
1.4. Evolución de la ocupación territorial. . . . .	32
1.4.1. Contexto Geológico y Geomorfológico . . . . .	34
1.5. Condiciones de lluvia del área de estudio . . . . .	37
1.5.1. Variación temporal . . . . .	37
1.5.1.1. Datos estaciones pluviométricas IDEAM . . . . .	38
1.5.1.2. Datos estimados por satélite CHIRPS . . . . .	43
1.5.2. Correlación IDEAM-Chirps . . . . .	45
1.5.3. Variación espacial . . . . .	48
1.6. Información secundaria . . . . .	48
1.6.1. Estudios previos . . . . .	48
1.6.2. Información Cartográfica . . . . .	50
<b>I Viabilidad Jurídica</b>	<b>56</b>
<b>2. Viabilidad Jurídica</b>	<b>57</b>
2.1. Antecedentes . . . . .	58
2.2. Viabilización del antiguo ETCR Los Monos a la luz de la norma de ordenamiento territorial vigente . . . . .	60
2.2.1. Viabilización por vía de revisión del POT . . . . .	60
2.2.1.1. Revisión Ordinaria del POT . . . . .	63
2.2.1.2. Modificación excepcional de norma urbanística . . . . .	69
2.2.1.3. Posturas jurídicas frente a la revisión del POT . . . . .	73

2.2.2.	Viabilización por vía de la creación de trámite extraordinario de aprobación de normas urbanísticas . . . . .	78
2.3.	Caracterización y análisis general de la norma territorial del municipio de Caldono . . . . .	81
2.3.1.	Análisis de tenencia antiguo ETCR Los Monos . . . . .	81
2.3.2.	Consulta previa . . . . .	83
2.3.3.	Caracterización general físico espacial . . . . .	86
2.3.4.	Norma general territorial aplicable al predio . . . . .	86
2.3.5.	Cálculo de aprovechamientos urbanísticos o intensidad en los usos del suelo. . . . .	88
2.4.	Conclusiones . . . . .	91
<b>II</b>	<b>Viabilidad Sanitaria</b>	<b>103</b>
<b>3.</b>	<b>Viabilidad Sanitaria</b>	<b>104</b>
3.1.	Variables del diseño . . . . .	104
3.2.	Normatividad . . . . .	105
3.3.	Proyección poblacional . . . . .	106
3.3.1.	Modelo de proyección de población . . . . .	107
3.4.	Caudales de diseño . . . . .	109
3.4.1.	Dotación de agua . . . . .	109
3.4.2.	Caudal de diseño sistema de tratamiento de agua potable	111
3.4.3.	Caudal de diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales . . . . .	112
3.4.4.	Oferta hídrica . . . . .	112
3.4.4.1.	Descripción de la fuente hídrica . . . . .	113
3.4.4.2.	Cálculo de caudal ambiental . . . . .	119
3.4.4.3.	Disponibilidad hídrica . . . . .	122
3.5.	Caracterización y calidad de agua a tratar . . . . .	123
3.5.1.	Calidad de agua para consumo humano . . . . .	123
3.5.2.	Calidad de vertimiento para aguas residuales . . . . .	124
3.6.	Tratamiento de aguas crudas . . . . .	125
3.7.	Tratamiento de aguas residuales . . . . .	126
3.7.1.	Proceso aerobio . . . . .	126
3.7.2.	Proceso anaerobio . . . . .	127
3.7.3.	Proceso anóxico . . . . .	127

<b>4. Metodología de Alternativas</b>	<b>129</b>
4.1. Tipos de tratamiento de aguas . . . . .	130
4.2. Alternativas de la PTAP . . . . .	131
4.2.1. Alternativa 1. (Coagulación+ floculación+ sedimentación+ filtración, desinfección) . . . . .	131
4.2.2. Alternativa 2 (Filtración directa + desinfección) . . . . .	132
4.2.3. Alternativa 3. (Tanque de agua cruda + micro y ultra-filtración + desinfección) . . . . .	132
4.3. Alternativas de la PTAR . . . . .	133
4.3.1. Alternativa 1. (Lodos Activados + Sedimentación) . . . . .	134
4.3.2. Alternativa 2 (UASB + FAFA+ Sedimentación) . . . . .	135
4.3.3. Alternativa 3. (Laguna facultativa y/o anaerobia) . . . . .	135
4.4. Matriz de decisión . . . . .	136
4.4.1. Aplicabilidad del proceso . . . . .	137
4.4.2. Generación de Residuos . . . . .	137
4.4.3. Aceptación por parte de la Comunidad . . . . .	138
4.4.4. Flexibilidad de la tecnología para adecuación a cumplimiento de cambio normativo . . . . .	138
4.4.5. Vida útil . . . . .	138
4.4.6. Requerimientos de Área . . . . .	138
4.4.7. Costos . . . . .	138
4.4.8. Diseño y Construcción . . . . .	139
4.4.9. Operación . . . . .	139
4.4.10. Entorno e Impacto al Medio Ambiente . . . . .	139
4.5. Operación matriz de decisión . . . . .	140
4.5.1. Ponderación de Rubros . . . . .	141
4.5.2. Características cuantificables de Alternativas . . . . .	142
4.5.3. Calificaciones Matriz PTAP . . . . .	146
4.5.4. Calificaciones Matriz PTAR . . . . .	150
4.6. Matriz de decisión y calificaciones . . . . .	155
4.6.1. Matriz de decisión PTAP . . . . .	156
4.6.2. Matriz de decisión PTAR . . . . .	157
4.7. Resultados y conclusiones . . . . .	158
<b>5. Captación y Aducción de agua cruda para tratamiento</b>	<b>160</b>
5.1. Captación . . . . .	160

5.2.	Sistema de pretratamiento - Desarenador . . . . .	162
5.3.	Conducción de agua cruda . . . . .	165
<b>6.</b>	<b>Planta de Tratamiento de Agua Potable</b>	<b>166</b>
6.1.	Diagrama de flujo de procesos . . . . .	168
6.2.	Tren de tratamiento de aguas . . . . .	169
6.2.1.	Dosificación de productos químicos para clarificación y desinfección . . . . .	169
6.2.1.1.	Cálculo de la dosificación de coagulante . . . . .	170
6.2.1.2.	Ajuste de pH y floculación . . . . .	171
6.2.1.3.	Cálculo dosificación de desinfectante . . . . .	171
6.2.2.	Floculador-Sedimentador de Manto de Lodos (FSML) . . . . .	172
6.2.3.	Sistema de filtración . . . . .	174
6.2.4.	Tanque de contacto . . . . .	176
6.2.5.	Tanque de almacenamiento . . . . .	177
6.3.	Tren de tratamiento de lodos . . . . .	179
6.3.1.	Pozo de lodos . . . . .	179
6.3.2.	Espesador hidráulico . . . . .	179
6.3.3.	Lechos de secado . . . . .	180
6.4.	Componentes generales . . . . .	182
6.4.1.	Caseta de operación . . . . .	182
6.4.2.	Vías y andenes dentro de la planta . . . . .	183
<b>7.</b>	<b>Planta de Tratamiento de Aguas Residuales</b>	<b>186</b>
7.1.	Diagrama de flujo de procesos . . . . .	188
7.2.	Tren de tratamiento de aguas . . . . .	189
7.2.1.	Canal de entrada y pretratamiento . . . . .	189
7.2.2.	Tanque de igualación de caudales . . . . .	191
7.2.3.	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente Mezcla Completa (UASB) . . . . .	191
7.2.4.	Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA) . . . . .	193
7.2.5.	Sedimentador secundario de alta tasa . . . . .	194
7.2.6.	Canal de salida y aforo . . . . .	196
7.2.7.	Estructura de descarga . . . . .	196
7.3.	Tren de tratamiento de lodos . . . . .	197
7.3.1.	Deshidratación de lodos . . . . .	197
7.3.2.	Disposición de biosólidos . . . . .	198

7.4. Componentes generales . . . . .	199
7.4.1. Caseta de operación . . . . .	199
7.4.2. Vías y andenes dentro de la planta . . . . .	200
7.4.3. Alternativas de ubicación PTAR . . . . .	200
7.5. Cálculo AU . . . . .	202
7.6. Ajuste Población . . . . .	202

### III Viabilidad por Amenaza

<i>Estudios Básicos de Amenaza</i>	<b>205</b>
------------------------------------	------------

### **8. Amenaza por Movimientos en masa** **206**

8.1. Marco normativo de gestión del riesgo . . . . .	207
8.2. Estudios previos . . . . .	209
8.3. Definición del área de influencia para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa . . . . .	210
8.4. Elaboración del inventario de movimientos en masa . . . . .	211
8.4.1. Catalogo histórico de eventos . . . . .	211
8.4.2. Procesos morfodinámicos . . . . .	213
8.5. Evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa . . . . .	214
8.5.1. Unidad de análisis y área mínima cartografiable . . . . .	215
8.5.2. Variables predictoras . . . . .	216
8.5.2.1. Inclinación de la ladera (IL) . . . . .	216
8.5.2.2. Pendiente (S) . . . . .	217
8.5.2.3. Relieve relativo (RR) . . . . .	217
8.5.2.4. Rugosidad (Rug) . . . . .	217
8.5.2.5. Índice de humedad topográfica (TWI) . . . . .	217
8.5.2.6. Índice de posición topográfica (TPI) . . . . .	217
8.5.2.7. Elevación relativa al cauce (EAS) . . . . .	218
8.5.2.8. Distancia al drenaje siguiendo la pendiente (DDS) . . . . .	218
8.5.2.9. Distancia a Fallas (DF) . . . . .	218
8.5.2.10. Geología Superficial (Gs) . . . . .	218
8.5.2.11. Evolución de las coberturas (Ec) . . . . .	218
8.5.2.12. Cinemático (Cin) . . . . .	218
8.5.2.13. Curvatura total (Cu) . . . . .	218
8.5.3. Selección de variables y estimación de pesos por AHP . . . . .	219
8.5.4. Descripción de variables y estimación de pesos de las clases . . . . .	221

8.5.4.1.	Geología Superficial (Gs)	222
8.5.4.2.	Evolución de las coberturas (Ec)	227
8.5.4.3.	Clasificación cinemática de laderas (Cin)	234
8.5.4.4.	Índice de humedad topográfica (TWI)	236
8.5.4.5.	Distancia a las Fallas (DF)	238
8.5.4.6.	Relieve relativo (RR)	239
8.5.4.7.	Pendiente (S)	240
8.5.4.8.	Elevación relativa al cauce (EAS)	241
8.5.4.9.	Curvatura (Cu)	242
8.5.5.	Mapa de susceptibilidad con AHP y asignacion directa	245
8.5.6.	Modelo de susceptibilidad	245
8.6.	Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia	246
8.6.1.	SHALSTAB	246
8.7.	Amenaza por movimientos en masa detonados por sismo	251
8.7.1.	Sismicidad histórica	251
8.7.1.1.	Sismo del 6 de junio de 1994 (Mw=6,8)	251
8.7.1.2.	Sismo del 9 de febrero de 2013 (Mw=7)	252
8.7.2.	Metodología - Bloque deslizante de Newmark	252
8.8.	Mapas de amenaza	257
<b>9.</b>	<b>Amenaza por Inundaciones</b>	<b>262</b>
9.1.	Estudios previos	262
9.2.	Definición del área de influencia para la evaluación de la amenaza por Inundación	263
9.3.	Catalogo histórico de eventos	264
9.4.	Estimación de caudales máximos	265
9.4.1.	Tiempos de concentración	266
9.4.2.	Curvas Intensidad - Duración - Frecuencia	267
9.4.3.	Distribución temporal de la tormenta de diseño	268
9.4.4.	Estimación de la infiltración	269
9.4.5.	Hidrógrafa unitaria	271
9.5.	Zonificación de manchas de inundación a escala de cuenca	272
<b>10.</b>	<b>Amenaza por Avenidas Torrenciales</b>	<b>278</b>
10.1.	Estudios previos	279
10.2.	Definición del área de influencia para la evaluación avenidas torrenciales	279

10.3. Evaluación de la susceptibilidad por avenidas torrenciales a nivel de cuenca . . . . .	280
10.3.1. Análisis morfométrico . . . . .	280
10.3.1.1. Parámetros relacionados a la red de drenaje . . . . .	280
10.3.1.2. Parámetros relacionados a la geometría y forma de la cuenca. . . . .	282
10.3.1.3. Parámetros relacionados a la textura de la cuenca. . . . .	284
10.3.1.4. Parámetros relacionados al relieve de la cuenca . . . . .	287
10.3.2. Aporte de sedimentos . . . . .	300
10.4. Zonificación de manchas de avenidas torrenciales a escala de cuenca	303
<b>11. Definición de áreas con condición de amenaza o riesgo</b>	<b>307</b>
11.1. Ocupación Territorial . . . . .	307
11.1.1. Áreas con condición de amenaza (ACA) . . . . .	308
11.1.2. Áreas con condición de riesgo (ACR) . . . . .	309
11.2. Medidas no estructurales . . . . .	311
11.2.0.1. Recomendaciones específicas . . . . .	311
<b>IV Viabilidad por Amenaza <i>Estudios de Detalle</i></b>	<b>313</b>
<b>12. Amenaza por Movimientos en masa</b>	<b>314</b>
12.1. Información cartográfica de detalle . . . . .	315
12.2. Geomorfología Local . . . . .	316
12.3. Procesos morfodinámicos . . . . .	321
12.4. Geología para ingeniería . . . . .	322
12.4.1. Exploración y parametrización geotécnica . . . . .	323
12.4.2. Unidades geológicas superficiales . . . . .	327
12.4.3. Prospección sísmica . . . . .	328
12.4.4. Análisis de laboratorio . . . . .	333
12.4.5. Zonas geotécnicas homogéneas . . . . .	335
12.5. TRIGRS . . . . .	339
12.5.1. Amenaza por movimientos en masa superficiales . . . . .	339
12.5.2. Modelo FOSM ( <i>First Order Second Moment</i> ) . . . . .	344
12.6. Scoops3D . . . . .	345
12.6.1. Modelo de estabilidad - Método Bishop simplificado. . . . .	349
12.6.2. Análisis sísmico . . . . .	351

12.6.3. Resultados. . . . .	353
12.7. Mapa de amenaza por movimiento en masa . . . . .	356
12.8. Análisis de estabilidad para sectores críticos . . . . .	358
12.8.1. Análisis de estabilidad para el corte C1 . . . . .	360
12.8.2. Análisis de estabilidad para el corte C2 . . . . .	361
12.8.3. Análisis de estabilidad para el corte C3 . . . . .	363
12.8.4. Análisis de estabilidad para el corte C4 . . . . .	366
12.8.5. Análisis de estabilidad para el corte C5 . . . . .	368
12.8.6. Análisis de estabilidad para el corte C6 . . . . .	369
12.8.7. Análisis de estabilidad para el corte C7 . . . . .	371
12.8.8. Análisis de estabilidad para el corte C8 . . . . .	374
12.8.9. Análisis de estabilidad para el corte C9 . . . . .	376
12.8.10. Análisis de estabilidad para el corte C10 . . . . .	378
<b>13. Amenaza por Inundaciones y Avenidas Torrenciales</b>	<b>384</b>
13.1. Definición de áreas propensas a inundación . . . . .	384
<b>14. Vulnerabilidad</b>	<b>386</b>
14.1. Vulnerabilidad social . . . . .	386
14.1.1. Fragilidades socioeconómicas . . . . .	389
14.1.2. Capacidades sociales . . . . .	393
14.2. Vulnerabilidad física . . . . .	396
14.2.1. Vulnerabilidad por Movimientos en masa . . . . .	397
14.2.1.1. Fragilidad . . . . .	397
14.2.1.2. Intensidad . . . . .	402
14.2.1.3. Mapa de vulnerabilidad por movimientos en masa	405
<b>15. Riesgo</b>	<b>408</b>
15.1. Riesgo actual . . . . .	409
15.2. Riesgo prospectivo . . . . .	410
15.3. Esquema de aproximación espacial . . . . .	411
15.3.1. Prototipo vivienda rural . . . . .	412
15.3.1.1. Evaluación de riesgo prospectivo . . . . .	413
15.4. Riesgo socioeconómico . . . . .	417
15.4.1. Matriz de riesgo . . . . .	418

<b>16. Medidas de mitigación y remediación</b>	<b>421</b>
16.1. Medidas no estructurales . . . . .	421
16.1.1. Umbrales de lluvia . . . . .	423
16.1.1.1. Umbrales de lluvia estaciones IDEAM escala dia- ria . . . . .	424
16.1.1.2. Umbrales de lluvia como sistemas de alerta tem- prana (SAT) . . . . .	426
16.1.2. Estrategias para el aprovechamiento del suelo . . . . .	427
16.2. Medidas estructurales . . . . .	428
16.2.1. Obra N°1 - Muro flexible (Gaviones) . . . . .	429
16.2.2. Obra N°2 y 3 - Prolongación conducción . . . . .	431
16.2.3. Obra N°4 y 5 - Canal de coronación . . . . .	432
16.2.4. Obra N°6 - Cuneta vía . . . . .	433
16.2.5. Obra N°7 - Canal en piedra . . . . .	434
16.2.6. Obra N°8, 9, 10 y 11 - Modificación de geometría . . . . .	435
16.2.7. Obra N°12, 13 y 14 - Revegetación y/o reforestación . . . . .	437
16.2.8. Obra N°15 y 16 - Canal en talud . . . . .	439
16.2.9. Obra N°17, 18 y 19 - Subdrenes horizontales . . . . .	439
16.3. Condición de riesgo . . . . .	441
<b>V Esquema de aproximación espacial</b>	<b>444</b>
<b>17. Esquema de aproximación espacial</b>	<b>445</b>
17.1. Planteamiento espacial . . . . .	445
17.1.1. Equipamientos . . . . .	448
17.1.2. Viviendas . . . . .	449
17.1.3. Infraestructura vial . . . . .	449
17.2. Borrador norma urbanística objeto de ajuste en Los Monos . . . . .	450
17.2.1. Componente general . . . . .	451
17.2.2. Componente rural . . . . .	452
17.3. Presupuesto . . . . .	457
17.3.1. Equipamientos . . . . .	458
17.4. Viviendas . . . . .	458
17.5. Infraestructura vial . . . . .	459
17.6. Obras de Mitigación . . . . .	459

17.6.1. Tratamiento de agua . . . . .	460
17.7. Resumen presupuestal . . . . .	461
<b>VI Concepto</b>	<b>462</b>
<b>18.Certificado de viabilidad</b>	<b>463</b>
<b>VII Anexo</b>	<b>465</b>
<b>19.Anexos</b>	<b>466</b>
19.1. Anexo 1 Levantamiento topográfico . . . . .	466
19.2. Anexo 2 Estudios subsuelo . . . . .	466
19.3. Anexo 3 Documentos normativos . . . . .	467
19.4. Anexo 4 Cálculos y estudios Agua . . . . .	467
19.5. Anexo 5 Cálculos presupuesto de vivienda . . . . .	468
19.6. Anexo 6 Estándares Cartográficos . . . . .	468

# Índice de figuras

1.	Ubicación de los antiguos ETCR a nivel nacional . . . . .	29
2.	Localización Los Monos. . . . .	32
3.	Evolución de la ocupación. . . . .	33
4.	Mapa Geológico 1:100.000 predio Los Monos . . . . .	34
5.	Mapa litoestructural predio Los Monos . . . . .	35
6.	Mapa Geomorfológico 1:100.000 predio Los Monos . . . . .	36
7.	Panorámica unidad de ladera de alta pendiente en el Noroeste de la zona de estudio . . . . .	36
8.	Panorámica unidad de ladera de morfología colinada, de cimas agudas y laderas moderadamente largas a muy largas . . . . .	37
9.	Estaciones IDEAM cercanas al ETCR-Los Monos . . . . .	38
10.	Precipitación diaria multianual estación Tunia . . . . .	39
11.	Precipitación diaria multianual estación Morales . . . . .	40
12.	Precipitación diaria multianual estación La Aguada . . . . .	40
13.	Precipitación mensual multianual para la estación La Tunia, A)Valores medios, máximos y mínimos. B)Precipitación media mensual multianual para meses con ocurrencia del El Niño y La Niña . . . . .	41
14.	Precipitación mensual multianual para la estación Morales, A)Valores medios, máximos y mínimos. B)Precipitación media mensual multianual para meses con ocurrencia del El Niño y La Niña . . . . .	42
15.	Precipitación mensual multianual para la estación La Agauda, A)Valores medios, máximos y mínimos. B)Precipitación media mensual multianual para meses con ocurrencia del El Niño y La Niña . . . . .	42
16.	Precipitación anual multianual de la estación Tunia, donde, las barras color rojo representan la ocurrencia de El Niño, el color azul La Niña y el gris periodos Neutros. . . . .	43

17.	Precipitación anual multianual de la estación Morales, donde, las barras color rojo representan la ocurrencia de El Niño, el color azul La Niña y el gris periodos Neutros. . . . .	44
18.	Precipitación anual multianual de la estación La Aguada, donde, las barras color rojo representan la ocurrencia de El Niño, el color azul La Niña y el gris periodos Neutros. . . . .	44
19.	Precipitación diaria multianual estimación CHIRPS a nivel sobre el área de estudio . . . . .	45
20.	Precipitación mensual multianual CHIRPS sobre el área de estudio, a)Valores medios, máximos y mínimos. b)Precipitación media mensual multianual para meses con ocurrencia del El Niño y La Niña . . . . .	46
21.	Precipitación anual multianual CHIRPS sobre el área de estudio, donde, las barras color rojo representan la ocurrencia de El Niño, el color azul La Niña y el gris periodos Neutros. . . . .	46
22.	Correlación de la información a escala diaria dada por los pluviómetros del IDEAM y CHIRPS en las estaciones A) Tunia, B) Morales y C) La Aguada. . . . .	47
23.	Correlación de la información a escala mensual dada por los pluviómetros del IDEAM y CHIRPS en las estaciones A) Tunia, B) Morales y C) La Aguada. . . . .	47
24.	Correlación de la información a escala anual dada por los pluviómetros del IDEAM y CHIRPS en las estaciones A) Tunia, B) Morales y C) La Aguada. . . . .	47
25.	Imagen satelital representativa de la misión Sentinel 1 del año 2020. . . . .	51
26.	Imagen satelital representativa de la misión Sentinel 2 del año 2019. . . . .	52
27.	Imagen satelital representativa de la misión Landsat 8 del año 2019. . . . .	53
28.	Imagen satelital representativa de la misión Landsat 5 del año 1996. . . . .	54
29.	Proceso de creación de los antiguos ETCR. Fuente Convenio 752 de 2020 . . . . .	60
30.	Cronograma aproximado de ejecución para la revisión ordinaria del PBOT . . . . .	68

31.	Cronograma aproximado de ejecución para un escenario de modificación excepcional de norma urbanística . . . . .	71
32.	Cronograma aproximado para un escenario Ley . . . . .	80
33.	Clasificación Suelo antiguo ETCR Los Monos (Municipio de Cal-dono). . . . .	87
34.	Área Neta Urbanizable en el antiguo ETCR La Fila (Municipio de Icononzo). Fuente: Cartografía PBOT - Municipio de Icononzo.	89
35.	Centro Poblado de referencia Pueblo Nuevo (Caldono) . . . . .	100
36.	Cuenca del sitio de captación . . . . .	114
37.	Sitio de captación para antiguo ETCR Los Monos . . . . .	115
38.	Cuenca e información hidrológica empleada para la calibra-ción del modelo . . . . .	116
39.	Esquema de funcionamiento del modelo . . . . .	117
40.	CDC entre la serie estimada y la observada . . . . .	120
41.	Serie de caudal estimada y observada . . . . .	121
42.	Serie de caudal sintética microcuenca abastecedora . . . . .	121
43.	Curva de duración de caudales - microcuenca abastecedora . . .	121
44.	Ciclo anual de caudales en año medio para microcuenca abaste-cedora . . . . .	122
45.	Balance de masas. . . . .	130
46.	Tren tratamiento PTAP Alternativa 1. . . . .	132
47.	Tren tratamiento PTAP Alternativa 2. . . . .	133
48.	Tren tratamiento PTAP Alternativa 3. . . . .	133
49.	Tren tratamiento PTAR Alternativa 1. . . . .	134
50.	Tren tratamiento PTAR Alternativa 2. . . . .	136
51.	Tren tratamiento PTAR Alternativa 3. . . . .	137
52.	Calidad de la fuente. . . . .	145
53.	Matriz de decisión PTAP. . . . .	156
54.	Matriz de decisión PTAR. . . . .	157
55.	Esquema 3D de la PTAP. . . . .	167
56.	Diagrama de flujo de procesos en la PTAP. . . . .	168
57.	Esquema Floculador Sedimentador de Manto de Lodos (FSML). .	172
58.	Esquema del filtro en arena. . . . .	174
59.	Esquema Tanque de contacto. . . . .	177
60.	Esquema Tanques de almacenamiento. . . . .	178

61.	Esquema del espesador hidráulico. . . . .	180
62.	Esquema de los lechos de secado. . . . .	181
63.	Estratificación de la estructura del lecho de secado (medidas en metros). . . . .	182
64.	Vista en planta de la distribución propuesta en la PTAP. . . . .	183
65.	Esquema 3D de la PTAR. . . . .	187
66.	Diagrama de flujo de procesos en la PTAR. . . . .	188
67.	Canal de entrada y pretratamiento de las aguas residuales. . . . .	190
68.	Esquema del reactor UASB. . . . .	192
69.	Esquema del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA). . . . .	194
70.	Modelo del Sedimentador Secundario con paneles de tasa alta. . . . .	195
71.	Esquema de los lechos de secado. . . . .	197
72.	Estratificación de la estructura del lecho de secado (medidas en metros). . . . .	198
73.	Vista en planta de la distribución propuesta en la PTAR. . . . .	199
74.	Alternativas de ubicación adicional para PTAR . . . . .	201
75.	Localización del área de estudio del antiguo ETCR Los Monos . . . . .	211
76.	Distribución espacial de movimientos en masa en el municipio de Caldone registrados en el catálogo SIMMA . . . . .	213
77.	Clasificación utilizada en la identificación de procesos morfodinámicos . . . . .	214
78.	Inventario procesos morfodinámicos Los Monos - Zona C . . . . .	215
79.	Matriz de correlación . . . . .	219
80.	Mapa Unidades Geológicas Superficiales predio Los Monos . . . . .	222
81.	Perfil de meteorización de Metasedimentarias Esquistosas (PZecm) . . . . .	223
82.	Suelo Residual (IB) de Metasedimentarias Esquistosas (PZecm) . . . . .	224
83.	Saprolito (IC) de Metasedimentarias Esquistosas (PZ?ecm) . . . . .	224
84.	Roca Alterada IIA (Transición Roca Suelo) . . . . .	225
85.	Roca parcialmente meteorizada (IIB) . . . . .	226
86.	Afloramientos asociados A depósitos de vertiente . . . . .	226
87.	Llenos Antrópicos . . . . .	227
88.	Coberturas actuales. . . . .	228
89.	Índice vegetación normalizado Los Monos año 1991-2020 . . . . .	229
90.	Representación estadística NDVI Los Monos . . . . .	230
91.	Tonalidades resultantes de combinación NDVI multitemporal . . . . .	231

92.	Representación multitemporal NDVI . . . . .	231
93.	Evolución de las coberturas multitemporal. . . . .	233
94.	Evolución de las coberturas. . . . .	234
95.	Cambio coberturas año 1996-2020 . . . . .	235
96.	Clasificación cinemática de laderas. . . . .	237
97.	Mapa del Índice de humedad topográfica antiguo ETCR Los Monos	238
98.	Mapa de distancia a las fallas antiguo ETCR Los Monos . . . . .	239
99.	Mapa de relieve relativo del antiguo ETCR Los Monos . . . . .	240
100.	Mapa de Pendientes del antiguo ETCR Los Monos . . . . .	241
101.	Mapa Índice de elevación relativa al cauce del antiguo ETCR Los Monos . . . . .	242
102.	Mapa de Curvatura Perfil y Plana del antiguo ETCR Los Monos	244
103.	Mapa de Curvatura Los Monos . . . . .	244
104.	Gráfica de abundancia de Curvatura Los Monos . . . . .	245
105.	Mapa de susceptibilidad como variable continua por movimientos en masa del antiguo ETCR Los Monos . . . . .	246
106.	Susceptibilidad final por movimientos en masa. . . . .	246
107.	Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia corres- pondiente al periodo de retorno de 10 años. . . . .	250
108.	Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia corres- pondiente al periodo de retorno de 100 años. . . . .	250
109.	Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia corres- pondiente al periodo de retorno de 500 años. . . . .	251
110.	Registro sismicidad histórica municipio de Caldono . . . . .	252
111.	Sismicidad histórica municipio de Caldono . . . . .	253
112.	Bloque deslizante método de Newmark . . . . .	253
113.	Amenaza por movimientos en masa detonados por sismo. a) Es- cenario #1 condición seca. b) Escenario #2 condición saturada. .	256
114.	Mapa de amenaza estudio básico para movimiento en masa . . .	258
115.	Localizacion de la Cuenca NN en el área de influencia del antiguo ETCR Los Monos . . . . .	264
116.	Localizacion de la quebrada Gusano en el área de influencia del antiguo ETCR Los Monos . . . . .	265
117.	Ubicación de Estaciones Pluviograficas . . . . .	267
118.	Curvas IDF Los Monos Cuenca NN . . . . .	268
119.	Curvas IDF Los Monos Qda. Gusano . . . . .	268

120. Diagrama de Huff para grupo de tormentas II . . . . .	269
121. Histograma de precipitación de diseño Cuenca NN Tr=100 años	270
122. Descripción HAND, fuente: (Rennó y cols., 2008) . . . . .	273
123. HAND Cuenca NN . . . . .	274
124. HAND Qda. Gusano . . . . .	274
125. Ejemplo - calado Cuenca NN . . . . .	275
126. Zonificación de amenaza estudio básico para inundación . . . . .	275
127. Diagrama conceptual de la evaluación de la amenaza por aveni- das torrenciales. . . . .	279
128. Cuencas los Monos . . . . .	280
129. Cambio de forma de la curva hipsométrica con la edad del río. Fuente: Elaboración propia . . . . .	289
130. Curvas hipsométricas e histograma de altitudes para las cuencas del antiguo ETCR Los Monos . . . . .	293
131. Perfil longitudinal de las cuencas Nn, Nn1, Nn2 y Qda. Gusano del antiguo ETCR Los Monos. . . . .	294
132. Umbrales de Wilford, Sakals, Innes, Sidle, y Bergerud (2004) aplicados para el antiguo ETCR Los Monos. . . . .	299
133. Comparación de variables con Rh para el antiguo ETCR Los Monos. . . . .	300
134. Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia corres- pondiente al periodo de retorno de 10 años. . . . .	301
135. Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia corres- pondiente al periodo de retorno de 100 años. . . . .	302
136. Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia corres- pondiente al periodo de retorno de 500 años. . . . .	302
137. Zonificación de amenaza estudio básico para avenidas torrenciales	304
138. Ocupación territorial . . . . .	308
139. Levantamiento Construcciones . . . . .	309
140. Zonas en condición de amenaza para el predio del antiguo ETCR.	310
141. Resultado del trabajo realizado con LIDAR, Elaborado con el software <i>Quick Terrain Reader</i> v 8.2.0. . . . .	316
142. Ortofotografía antiguo ETCR Los Monos, Caldono, Cauca . . .	317
143. Modelo digital de terreno(DTM), antiguo ETCR Los Monos, Cal- dono, Cauca . . . . .	317

144. Modelo digital de superficie(DSM) antiguo ETCR Los Monos, , Caldono, Cauca. . . . .	318
145. Mapa de unidades geomorfológicas en el antiguo ETCR Los Monos	319
146. Lacxr-Ladera abrupta corta convexa rugosa . . . . .	320
147. Laccl-Ladera abrupta corta cóncava lisa . . . . .	320
148. LaMcl-Ladera abrupta moderada cóncava lisa . . . . .	321
149. Lomp-Loma muy baja plana . . . . .	321
150. Lmcccl-Ladera moderada corta cóncava lisa . . . . .	322
151. LaMcr-Ladera abrupta moderada cóncava rugosa . . . . .	322
152. Mapa de procesos morfodinámicos en el antiguo ETCR Los Monos	323
153. Proceso morfodinámico en la vía . . . . .	324
154. Proceso morfodinámico en la vía . . . . .	324
155. Erosión en lleno antropico Qll . . . . .	325
156. Ubicación exploración ejecutada . . . . .	326
157. Ilustraciones de apiques y perforaciones. (a) Perforaciones a 6m y 3m de profundidad con diámetro de 55mm con toma de muestra alterada o inalterada cada 50cm. (b) Apique con dimensiones 1x1x1,5m con toma de muestra inalterada a 0,5m de profundidad y alterada a 1,5m. . . . .	326
158. Mapa de unidades geológicas superficiales (UGS) en el antiguo ETCR Los Monos. Depósitos Antrópicos (Qll), Suelo Residual VI- Metasedimentaria Esquistosa (PZ?ecm) . . . . .	327
159. Suelo Residual VI Metasedimentaria Esquistosa (PZ?ecm-sr) . .	328
160. Bloque meteorizado de Metasedimentaria Esquistosa (PZ?ecm) .	329
161. Depósitos Antrópicos en el antiguo ETCR Los Monos . . . . .	330
162. Esquema ensayo de refracción sísmica (ASTM, 2011) . . . . .	331
163. Perfil 2D $V_s$ línea 1 . . . . .	332
164. Perfil 2D $V_s$ línea 2 . . . . .	333
165. Variabilidad en los limites de consistencia de la zona 1 mediante la Carta de plasticidad de Casagrande. . . . .	338
166. Variabilidad en los limites de consistencia de la zona 2 mediante la Carta de plasticidad de Casagrande. . . . .	338
167. Esquema metodológico de la evaluación de amenaza empleando TRIGRS como modelo de amenaza. Adaptado de van Westen, Castellanos, y Kuriakose (2008) . . . . .	340

168. Condiciones hidrológicas en los estratos superficiales del suelo. Adaptado de Baum, Savage, Godt, y (U.S.) (2008) . . . . . 341

169. Amenaza por movimientos en masa tipo planar- a) Escenario Tr=10 años parcialmente saturado . . . . . 346

170. Amenaza por movimientos en masa tipo planar- Escenario Tr=10 años saturado . . . . . 346

171. Amenaza por movimientos en masa tipo planar- Escenario Tr=100 años parcialmente saturado . . . . . 347

172. Amenaza por movimientos en masa tipo planar- Escenario Tr=100 años saturado . . . . . 347

173. a) Matriz de análisis Scoops3D (Reid, Christian, Brien, y Henderson, 2015). b) Capas de entrada . . . . . 348

174. a) Diagrama 3D del análisis de estabilidad (Reid y cols., 2015). b) Diagrama de fuerzas sobre columna típica (Zhang y Wang, 2019) . . . . . 350

175. Espectro elástico de aceleraciones en superficie, amortiguamiento del 5 % (de Ingeniería Sísmica, 2010) . . . . . 351

176. Coeficiente de amplificación  $F_a$  del suelos para periodos cortos del espectro (de Ingeniería Sísmica, 2010) . . . . . 352

177. Amenaza por movimientos en masa tipo circular a) Escenario 1 estado seco . . . . . 354

178. Amenaza por movimientos en masa tipo circular b) Escenario 2 estado seco y fuerza sísmica . . . . . 354

179. Amenaza por movimientos en masa tipo circular c) Escenario 3 nivel de agua alto . . . . . 355

180. Amenaza por movimientos en masa tipo circular d) Escenario 4 nivel de agua alto y fuerza sísmica . . . . . 355

181. Amenaza por movimientos en masa tipo planar . . . . . 356

182. Amenaza por movimientos en masa tipo circular . . . . . 357

183. Ajuste heurístico . . . . . 358

184. Amenaza estudio detalle para movimientos en masa . . . . . 359

185. Mapa de las unidades de ladera y los cortes realizados para el antiguo ETCR Los Monos . . . . . 360

186. Perfil del corte C1 para escenarios más críticos con remoción del lleno antrópico . . . . . 363

187. Perfil del corte C3 para escenarios más críticos con remoción del lleno antrópico y cambio en la profundidad del nivel freático . . .	366
188. Perfil del corte C4 en escenario más crítico (sismo circular) con terracedo. . . . .	368
189. Perfil del corte C5 en escenario más crítico (sismo circular) con terracedo. . . . .	370
190. Perfil del corte C7 en escenario más crítico (Sismo Circular) con disminución del nivel freático, terrazas y anclajes. . . . .	375
191. Perfil del corte C9 en escenario más crítico (Sismo Circular) con disminución del nivel freático y anclajes. . . . .	378
192. Perfil del corte C10 en escenario más crítico (Sismo Circular) con disminución del nivel freático, terrazas y anclajes. . . . .	380
193. Áreas inundables cerca al antiguo ETCR Los Monos. . . . .	385
194. Fragilidad social y económica antiguo ETCR . . . . .	391
195. Capacidades antiguo ETCR . . . . .	394
196. Planos módulos actuales de vivienda "Galpones", (Barreto, 2019)	400
197. Estructuras encontradas en el antiguo ETCR. (a) PTAP, (b) Sala Confección, (c) Puesto Salud, (d) Modulo Vivienda . . . . .	401
198. Mapas de propagación por movimientos en masa en el escenario actual del antiguo ETCR de Los Monos. . . . .	404
199. Vulnerabilidad por movimientos en masa en el escenario actual del antiguo ETCR de Los Monos . . . . .	406
200. Elementos actuales dentro del antiguo ETCR Los Monos . . . . .	410
201. Propuesta predios para viviendas . . . . .	412
202. Viviendas guías . . . . .	413
203. Prototipo vivienda rural proyectada . . . . .	413
204. Mapas de propagación por movimientos en masa, escenario proyectado en el antiguo ETCR Los Monos. . . . .	415
205. Vulnerabilidad por movimientos en masa de viviendas proyectadas en el antiguo ETCR Los Monos . . . . .	416
206. Viviendas proyectadas dentro del antiguo ETCR Los Monos . .	416
207. Nivel de riesgo . . . . .	418
208. Umbral de lluvia estación La Aguada IDEAM . . . . .	425
209. Umbral de lluvia estación Morales IDEAM . . . . .	425

210. Umbral de lluvia estación Tunia IDEAM . . . . .	426
211. Ubicación obras de mitigación y remediación . . . . .	429
212. Esquema muro flexible tipo gavión(Suárez, 2009) . . . . .	430
213. Lleno antropico . . . . .	430
214. Perfil obra N°1 . . . . .	431
215. Enrocado en salida de tuberías (Suárez, 2001) . . . . .	432
217. Canal de coronación . . . . .	433
218. Canal escalonado (Suárez, 2001) . . . . .	433
220. Cuneta vía (Secretaría de infraestructura física departamento de Antioquia, 2019) . . . . .	434
221. Perfil obra N°6 . . . . .	435
222. Canal de piedra (Suárez, 2001) . . . . .	435
223. Perfil obra N°7 . . . . .	436
224. Talud - Obra N°8 . . . . .	437
225. Modificación de geometría de taludes (Suárez, 2001) . . . . .	438
227. (Suárez, 2001) . . . . .	439
228. Ilustraciones obra N°10 y 11 (Suárez, 2001) . . . . .	440
229. Esquema uso de subdrenes horizontales (Suárez, 2009) . . . . .	440
230. Perfil Obra N°18 . . . . .	441
231. Perfil Obra N°19 . . . . .	441
232. Mapa de condición de riesgo . . . . .	442
233. Restricciones normativas . . . . .	446
234. Evaluación de amenazas . . . . .	447
235. Propuesta de predios . . . . .	450
236. Infraestructura vial propuesta . . . . .	451
237. Costo total . . . . .	461

# Índice de tablas

1.	Estaciones pluviométricas del IDEAM cercanas al antiguo antiguo ETCR-Los Monos. . . . .	38
2.	Análisis de la propiedad al inmueble Los Monos. . . . .	81
3.	Cálculo de aprovechamientos para predio Los Monos. . . . .	89
4.	Propuesta general de modificación e incorporación de artículos revisión PBOT. . . . .	94
5.	Información Centro Poblado de referencia . . . . .	101
6.	Calculo de la densidad del centro poblado de referencia . . . . .	101
7.	Proyección poblacional para los años establecidos en el periodo de diseño . . . . .	108
8.	Usos del agua en viviendas. . . . .	110
9.	Volumen de subsistencia para el antiguo ETCR de estudio. . . . .	111
10.	Porcentaje de uso de agua de los proyectos productivos en la antiguo ETCR. . . . .	111
11.	Características de la fuente abastecedora proyectada antiguo ETCR Los Monos . . . . .	113
12.	Parámetros calibrados para el modelo de tanques . . . . .	120
13.	Caudal ambiental microcuenca abastecedora . . . . .	122
14.	Disponibilidad hídrica año seco y año medio para la microcuenca . . . . .	123
15.	Caracterización de agua cruda según el grado de polución de la fuente (de Desarrollo Economico, 2000). . . . .	123
16.	Composición típica agua residual doméstica (Metcalf, Eddy, y Tchobanoglous, 1979). . . . .	125
17.	Ponderación de factores según criterios . . . . .	141
18.	Cálculos alternativas PTAP . . . . .	142
19.	Cálculos alternativas PTAR . . . . .	143

20.	Composición típica agua residual doméstica . . . . .	144
21.	Calificaciones de PTAP . . . . .	146
22.	Calificaciones de PTAR . . . . .	150
23.	Procesos de remoción de parámetros del agua cruda. . . . .	169
24.	Dosificación de coagulante. . . . .	171
25.	Dosificación desinfectante en la PTAP. . . . .	172
26.	Dimensiones del FSML. . . . .	173
27.	Dimensiones del filtro propuesto. . . . .	175
28.	Dimensiones del tanque de contacto. . . . .	176
29.	Dimensiones del tanque de almacenamiento. . . . .	177
30.	Tiempo de vaciado del tanque. . . . .	178
31.	Concentración de parámetros en el agua de salida de la planta. . . . .	196
32.	Escala de importancia relativa. modificada de (Saaty, 1980) . . . . .	221
33.	Matriz de calificación AHP . . . . .	221
34.	Pesos de las variables . . . . .	222
35.	Unidades geológicas presentes en el área de influencia para la evaluación de amenaza en el antiguo ETCR Los Monos . . . . .	227
36.	Matriz de confusión del algoritmo de clasificación. Los valores se dan en porcentaje (%). . . . .	228
37.	Cambio de cobertura antiguo ETCR Los Monos . . . . .	235
38.	Clasificación cinemática de laderas. A: aspecto ( $0^{\circ}$ - $360^{\circ}$ ), S: pen- diente ( $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$ ), $\alpha$ : dirección del buzamiento ( $0^{\circ}$ - $360^{\circ}$ ) y $\theta$ : buza- miento ( $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$ ). Modificado de Meentemeyer y Moody (2000). . . . .	236
39.	Índice de humedad topográfica antiguo ETCR Los Monos . . . . .	238
40.	Tabla de distancia a las fallas del antiguo ETCR Los Monos . . . . .	239
41.	Índice de relieve relativo ETCR Los Monos . . . . .	240
42.	Tabla de Índice de la pendiente del antiguo ETCR Los Monos . . . . .	241
43.	Tabla de Índice de elevación relativa al cauce del antiguo ETCR Los Monos . . . . .	242
44.	Rangos de las geoformas . . . . .	243
45.	Clases de geoformas con sus respectivas áreas de ocupación en la zona de estudio y el peso asignado para la evaluación de la amenaza. . . . .	243
46.	Mapa de susceptibilidad, Los Monos. . . . .	245
47.	Parámetros geotécnicos para las unidades geológicas superficiales . . . . .	249

48.	Escenarios de lluvia establecidos para periodos de retorno (Tr) de 10, 100 y 500 años. . . . .	249
49.	Parámetros geotécnicos para las unidades geológicas superficiales	256
50.	Expresiones para calcular el tiempo de concentración . . . . .	266
51.	Tiempos de concentración . . . . .	266
52.	Estimación del número de curva de la Cuenca NN . . . . .	271
53.	Estimación del número de curva de la qda. Gusano . . . . .	271
54.	Parámetros de pérdidas por infiltración . . . . .	271
55.	Caudales máximos para diferentes tiempos de retorno de la Cuenca NN . . . . .	272
56.	Caudales máximos para diferentes tiempos de retorno de la quebrada Gusano . . . . .	272
57.	Características de la cuenca de acuerdo con el valor Ff . . . . .	283
58.	Características de la cuenca de acuerdo con el valor de Cc. . . . .	284
59.	Características de la cuenca de acuerdo con el valor Fs . . . . .	285
60.	Características de la cuenca de acuerdo con el valor Dd . . . . .	285
61.	Características de la cuenca de acuerdo con el valor Lg . . . . .	287
62.	Distribución del numero de robustez. . . . .	288
63.	Limites de clases para procesos hidrogeomorfológicos relacionados con el indice de Melton (Wilford y cols., 2004). . . . .	289
64.	Parámetros morfométricos de la cuenca utilizados para la evaluación de torrencialidad . . . . .	291
65.	Índices morfométricos para la evaluación de la torrencialidad de las Cuencas Nn, Nn1, Nn2 y Qda. Gusano del antiguo ETCR Los Monos . . . . .	292
66.	Cálculo de caudal total para avenidas torrenciales Cuenca NN .	303
67.	Cálculo de caudal total para avenidas torrenciales Qda. Gusano	304
68.	Clasificación perfiles del suelo a partir de Tabla A.2.4.4 NSR-10 (de Ingeniería Sísmica, 2010) . . . . .	330
69.	Perfil de suelo . . . . .	332
70.	Distribución ensayos de laboratorio . . . . .	333
71.	Recopilación de parámetros obtenidos mediante ensayos de laboratorio . . . . .	335
72.	Recopilación de parámetros obtenidos mediante ensayos de laboratorio - Plantas . . . . .	336

73.	Parámetros geotécnicos para las unidades geológicas superficiales	339
74.	Parámetros hidráulicos empleados en la condición parcialmente saturada para las zonas geotécnicas homogéneas. . . . .	343
75.	Intensidades de Lluvia . . . . .	343
76.	Valores medios y porcentaje de variación para el modelo FOSM (Assis, Espósito, Gardoni, Silva, y Maia, 2012) . . . . .	345
77.	Parámetros geotécnicos para análisis en Scoops3D. . . . .	349
78.	Porcentaje de área de $FS$ por escenario evaluado . . . . .	353
79.	Porcentaje de mapa de amenaza por movimientos en masa . . . . .	357
80.	Resultados de Slide para C1 y escenario más crítico . . . . .	362
81.	Resultados de Slide para C2 y escenario más crítico . . . . .	364
82.	Resultados de Slide para C3 y escenario más crítico . . . . .	365
83.	Resultados para C4 y escenario más crítico con sismo y sin sismo. 367	
84.	Resultados para C5 y escenario más crítico con sismo y sin sismo. 370	
85.	Resultados para C6 y escenario más crítico con sismo y sin sismo. 372	
86.	Resultados de Slide para C7 y escenario más crítico . . . . .	373
87.	Resultados de Slide para C8 y escenario más crítico . . . . .	376
88.	Resultados de Slide para C9 y escenario más crítico . . . . .	377
89.	Resultados de Slide para C7 y escenario más crítico . . . . .	379
90.	Esquema elementos para establecer la vulnerabilidad . . . . .	390
91.	Escala de valoración . . . . .	391
92.	Escala de valoración . . . . .	394
93.	Factores de fragilidad por tipología de estructuras . . . . .	398
94.	Factor de fragilidad por altura de la edificación . . . . .	398
95.	Factores de fragilidad por estado de conservación de la edificación 399	
96.	Factor de fragilidad por edad de la edificación . . . . .	399
97.	Vida útil en función del tipo de edificación . . . . .	399
98.	Factores de fragilidad de las estructuras. . . . .	401
99.	Presión límite o de falla, según tipo de estructuras. Fuente:(SGC, 2016) . . . . .	403
100.	Parámetro de intensidad por presión del impacto ( $I_{f-pre}$ ). Fuente:(SGC, 2016) . . . . .	403
101.	Parámetro de intensidad según la profundidad del deslizamiento y la altura de las edificaciones. Fuente:SGC (2016) . . . . .	405
102.	Probabilidad espacial de la amenaza por movimientos en masa . . . . .	409

103. Pérdidas Esperadas Anuales (PEA) del escenario actual de algunas viviendas expuestas en el antiguo ETCR Los Monos . . . . .	410
104. Factores de fragilidad de las estructuras. . . . .	414
105. Pérdidas Esperadas Anuales (PEA) del escenario proyectado de algunas viviendas expuestas en el antiguo ETCR Los Monos . . .	417
106. Evaluación del riesgo . . . . .	418
107. Áreas aprovechamiento del suelo . . . . .	428
108. influencia de instituciones educativas y unidades productivas . . .	448
109. uso del suelo . . . . .	454
110. Uso con áreas mínimas y máximas . . . . .	454
111. Densidad habitacional . . . . .	455
112. Cesiones urbanísticas . . . . .	456
113. Resumen costo equipamientos . . . . .	458
114. Resumen de costo para viviendas por tipología . . . . .	459
115. Resumen costo infraestructura vial . . . . .	459
116. Resumen obra de mitigación . . . . .	460
117. Resumen costo tratamiento de agua . . . . .	461

## Introducción

El Gobierno de Colombia suscribió con el grupo armado FARC-EP el acuerdo final para la terminación del conflicto armado donde se dispuso, en el subpunto 3.1.4.1 del punto 3, referido al Fin del Conflicto, la creación, inicialmente, de 20 Zonas Veredales Transitorias de Normalización (ZVTN) y 7 Puntos Transitorios de Normalización (PTN). Con la terminación de las ZVTN el 15 de agosto del 2017, se iniciaron los Espacios Territoriales de Capacitación y Reincorporación (ETCR), los cuales son administrados por la Agencia para la Reincorporación y Normalización (ARN). Los ETCR tenían una duración de 24 meses, es decir, que el 15 de agosto de 2019 terminó su figura jurídica transitoria.

Bajo este contexto, el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio contrató con la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, los estudios de prefactibilidad y factibilidad de 5 ETCR que permitiera su desarrollo dentro del territorio (Figura 1), considerando las condiciones de amenaza por fenómenos naturales y disponibilidad de saneamiento, al igual que el marco normativo de ordenamiento territorial.

El presente informe corresponde al Informe final para el antiguo ETCR denominado Los Monos, localizado en el departamento del Cauca. El presente informe contiene, de acuerdo con la minuta del contrato, la compilación y análisis normativo referente y necesario para el desarrollo de proyectos de vivienda en los antiguos ETCR; La evaluación del recurso hídrico para el abastecimiento y el diseño de una Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) y Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR); el estudio de viabilidad de amenaza en los fenómenos de movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en escala 1:25.000 y 1:2.000 y finaliza con la elaboración de un presupuesto estimado de ejecución del proyecto de vivienda y uso complementarios.

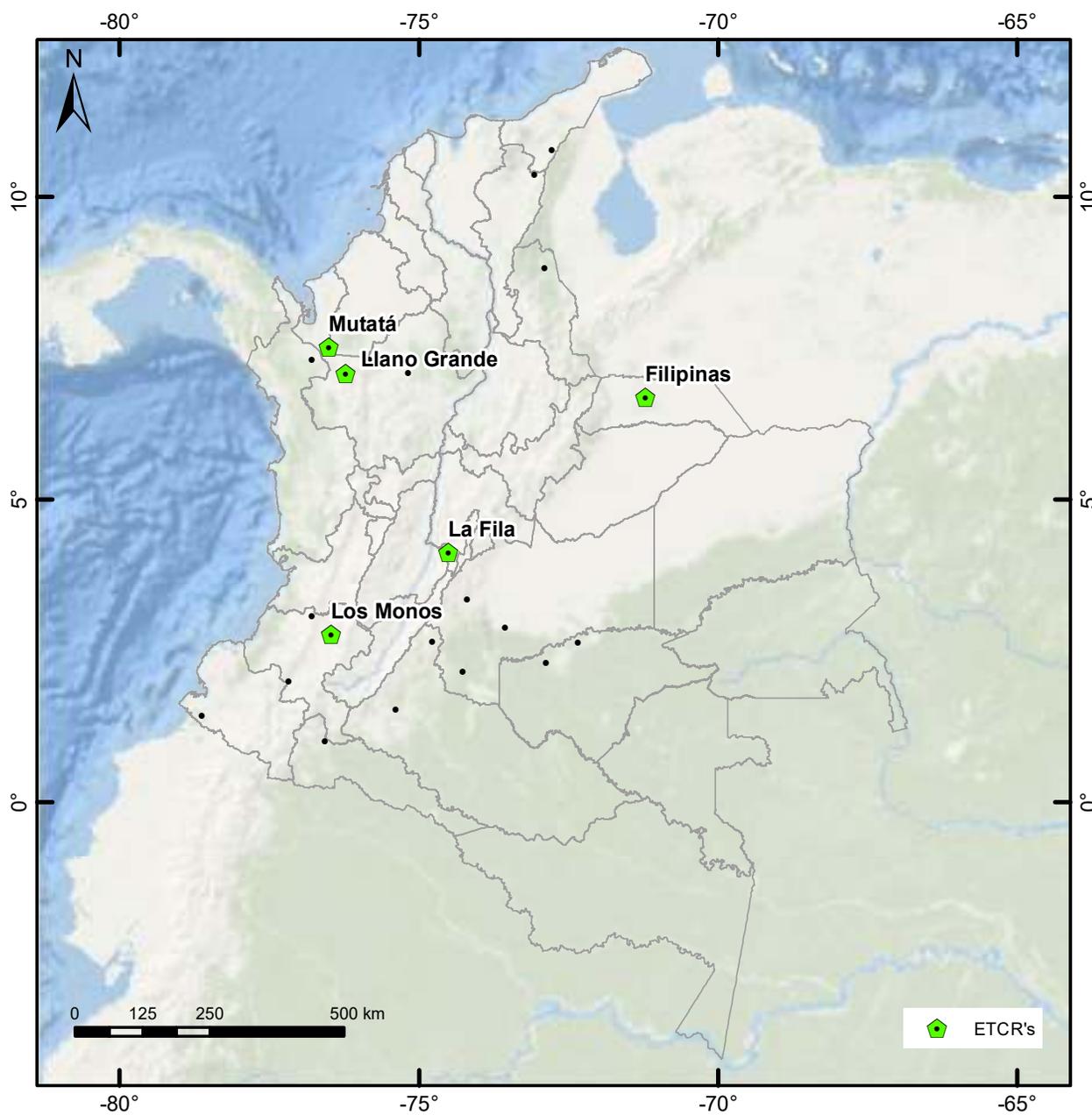


Figura 1: Ubicacion de los antiguos ETCR a nivel nacional

# Capítulo 1

## Generalidades

### 1.1. Objeto

El presente estudio tiene como objetivo general elaborar estudios de pre-factibilidad y factibilidad para establecer la viabilidad jurídica, técnica y económica de la construcción de proyectos de vivienda en (5) cinco antiguos Espacios Territoriales de Capacitación y Reincorporación (ETCR), con el fin de otorgar una solución de vivienda permanente para la población en proceso de reincorporación y sus familias.

Para lograr dicho objeto se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Avanzar técnicamente para el otorgamiento de soluciones de vivienda para las personas que se encuentren en proceso de reincorporación y sus familias que habitan los ETCR.
- Ofrecer las garantías técnicas para que hombres y mujeres en proceso de reincorporación puedan acceder al derecho de contar con una vivienda digna y propia.

Los (5) cinco antiguo ETCR seleccionados para los estudios son:

1. Filipinas, municipio de Arauquita, departamento de Arauca.
2. **Los Monos, municipio de Caldono, departamento de Cauca.**
3. Llano Grande, municipio de Dabeiba, departamento de Antioquia.
4. La Fila, municipio de Icononzo, departamento de Tolima.
5. Mutatá, municipio de Mutatá, departamento de Antioquia.

## 1.2. Alcances

El alcance del presente estudio apunta a la viabilidad en términos jurídicos, de amenaza por fenómenos naturales y disponibilidad de recurso hídrico del antiguo ETCR Los Monos.

Para establecer dicha viabilidad se elaborarán estudios normativos en el marco del ordenamiento territorial colombiano; al igual que los estudios básicos de amenaza y estudios de detalle por movimientos en masa, inundaciones y avenida torrenciales regulados por el Decreto 1077 de 2015 para la incorporación de la gestión del riesgo de desastres en los planes de ordenamiento territorial (POT). Finalmente, se evaluará la viabilidad de la disponibilidad de agua potable y vertimiento de aguas sucias, con los diseños de la estructura de captación, planta de potabilización y tratamiento de aguas residuales.

Cada uno de estos estudios y los resultados de viabilidad se realizan de acuerdo con las particularidades en cada uno de los territorios. Por lo tanto, aunque el alcance es uno solo en dirección de la viabilidad en términos jurídicos, de amenaza y de disponibilidad del recurso hídrico, el acercamiento a cada territorio y el desarrollo metodológico pueden ser diferentes. Sin embargo este ajuste a las particularidades de cada antiguo espacio territorial se concreta a medida que se avance en el trabajo en terreno de la mano de los actores locales.

## 1.3. Localización del área de estudio

El predio Los Monos se ubica en el municipio de Caldono del departamento del Cauca a  $67km$  de distancia de Popayán. Está ubicado en la zona Andina, en la vertiente occidental de la cordillera Central. El municipio de Caldono limita con los municipios de Jámalo y Silvia, al Oeste con los municipios de Morales y Piendamó, al sur con los municipios de Silvia y Piendamó y al norte con los municipios de Santander de Quilichao y Buenos Aires, dentro de su territorio se ubican tres resguardos indígenas: La Laguna Siberia, Las Mercedes y Tumburao.

Como actividades económicas, en el municipio de Caldono se desarrollan cultivos transitorios y permanentes de café, mora, caña panelera, fique que son realizados en un alto porcentaje por los resguardos indígenas de la Laguna, Caldono y Las Mercedes.

El clima se distribuye entre templado y frío con una temperatura promedio anual de  $19,2^{\circ}C$  aproximadamente, siendo agosto el mes de mayor temperatura

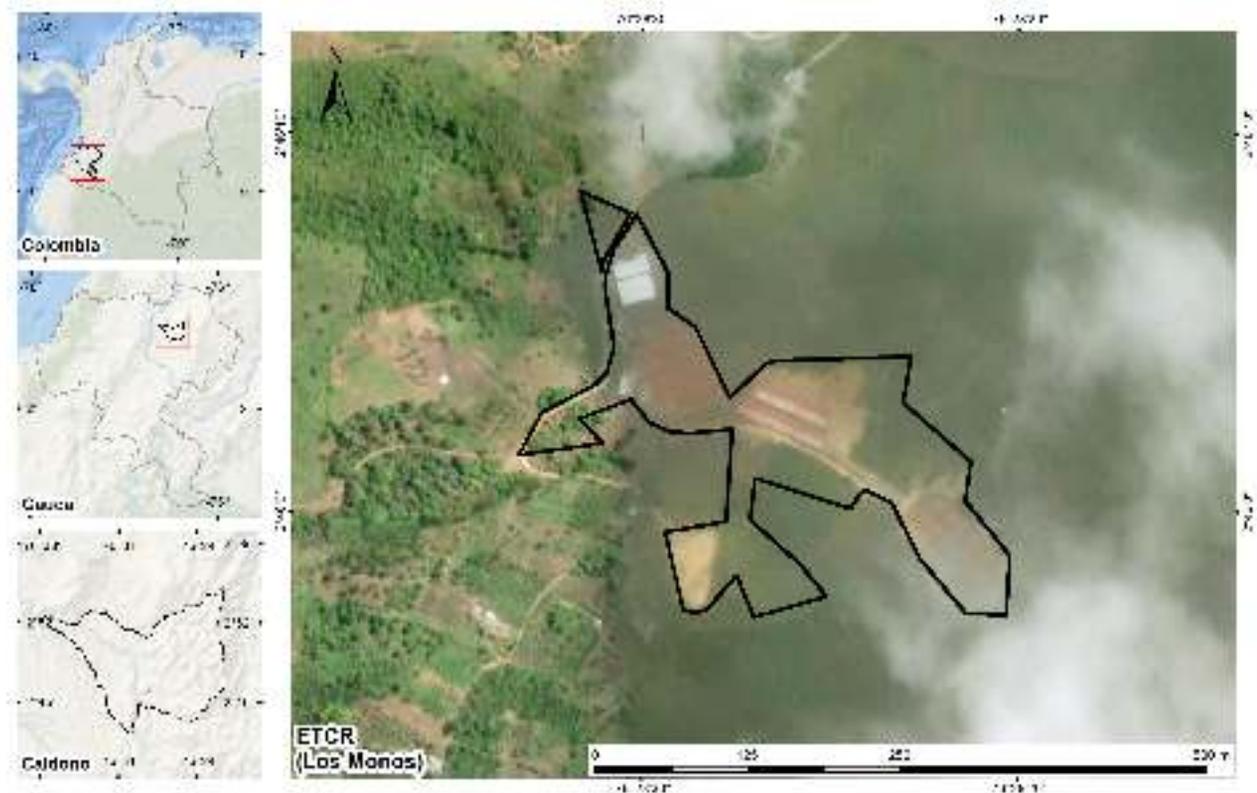


Figura 2: Localización Los Monos.

y noviembre el de menor temperatura. La precipitación media anual es de 1652 mm, distribuida en un régimen bimodal.

#### 1.4. Evolución de la ocupación territorial.

Contando con una visualización de cuenca y áreas aledañas al antiguo ETCR se realiza una revisión para considerar el desarrollo comunitario a través de las imágenes existentes de la zona que cuenten con la resolución para identificar la presencia de viviendas como medidor de la ocupación. En la cuenca no se encuentran construcciones representativas en las imágenes satelitales analizadas anteriores al año 1996. Solamente se encuentran unas pocas, dispersas y pequeñas. En el año 2008 se encuentra un ligero aumento de las construcciones aún dispersas.

En el año 2018 comienza la ocupación del predio del antiguo ETCR pero no se cuenta con imágenes satelitales de buena calidad para poder analizar este año. El aumento significativo en las construcciones se da en el año 2020 donde se aprecian crecimiento sobre el predio del antiguo ETCR y de las construcciones

dispersas asociadas principalmente a las vías que cruzan la cuenca. Para este año se llega a un área urbana de más de  $80.000\text{ m}^2$  lo que representa un crecimiento mayor al  $1.000\%$  con respecto al año 2008.

En la Figura 3 se puede apreciar la evolución de la ocupación en la cuenca desde el año 1996 hasta el presente. Este análisis se realiza en la plataforma *Google Earth Engine* a través del algoritmo *Random Forest* al realizar una clasificación supervisada de las imágenes satelitales de Sentinel 2 para el año 2020, Landsat 8 para el año 2016, Landsat 7 para el año 2008 y Landsat 5 para 1996.

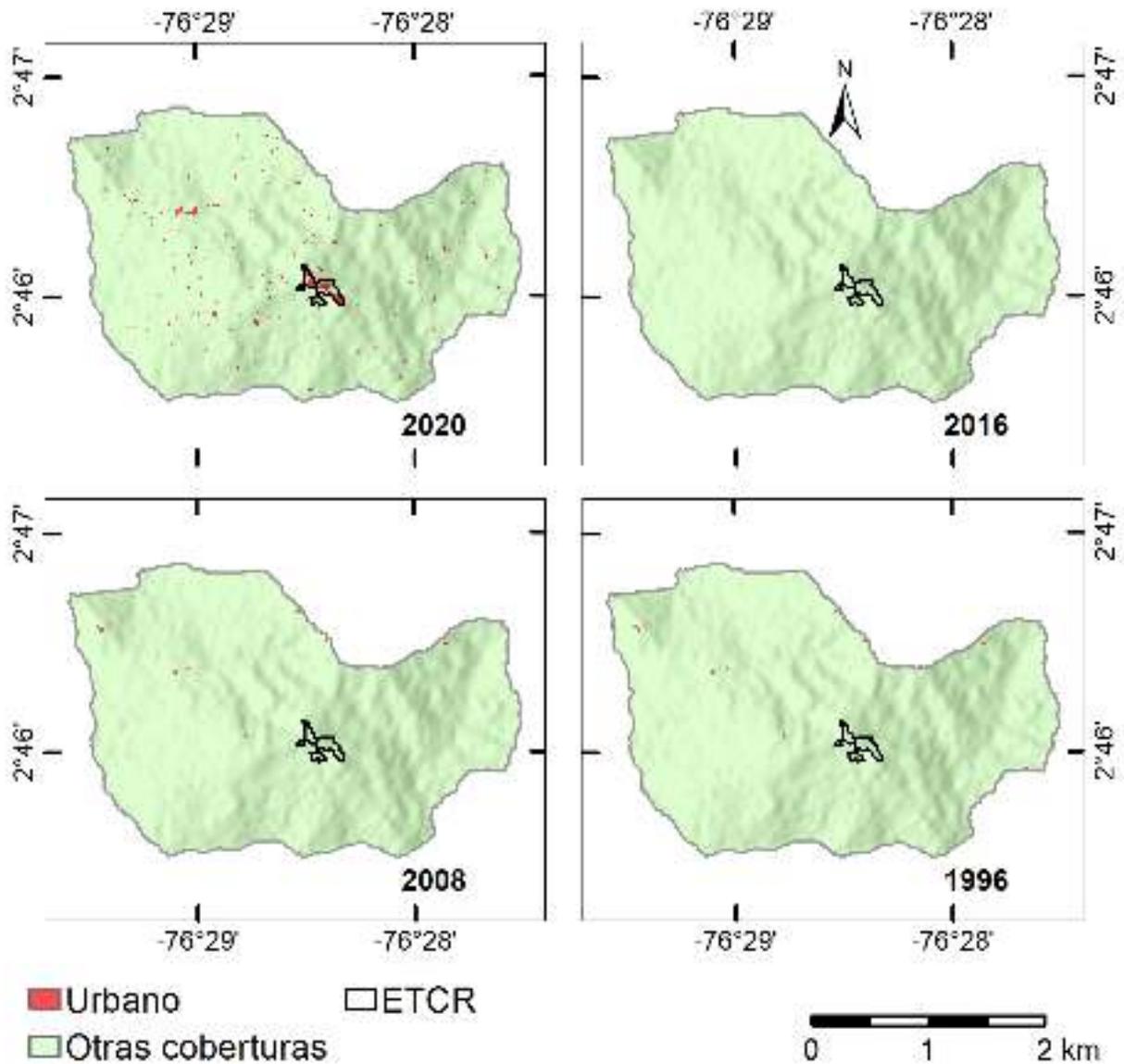


Figura 3: Evolución de la ocupación.

### 1.4.1. Contexto Geológico y Geomorfológico

El predio Los Monos se encuentra en la plancha geológica 343-Silvia (INGEOMINAS, 2003), la cual está constituida por rocas pertenecientes al complejo polimetamórfico de la cordillera Central que van desde el Paleozoico al reciente. El área de estudio está sobre la zona de influencia del complejo Arquia (PZ?ecm) en la unidad Esquistos Verdes de la Mina sobre el miembro Esquistos verdes o metabasitas (Figura 4) que se encuentra en contacto fallado al Este con el miembro conjunto de rocas metasedimentarias mientras que en el oeste se encuentra en contacto discordante con los miembros Miembro Sombrerillo y Miembro Caldono de la formación Popayán, mientras que al Sur se encuentra en contacto discordante con el Miembro La Venta de la formación Popayán. La geología regional descrita para el predio Los Monos se toma de la memoria explicativa de la geología de la Plancha 343 Silvia (INGEOMINAS, 2003).

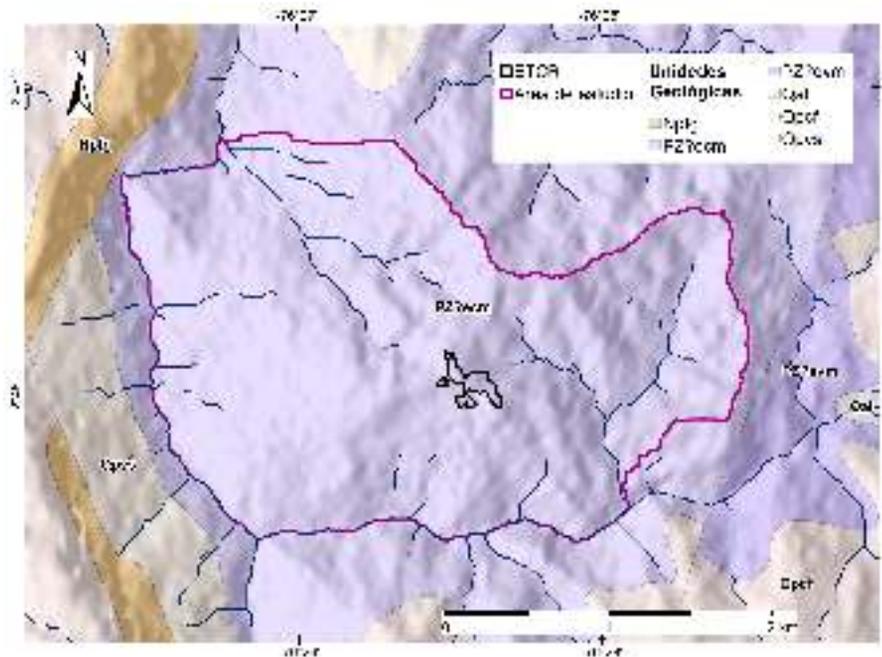


Figura 4: Mapa Geológico 1:100.000 predio Los Monos

El Complejo Arquia lo componen Esquistos Verdes de la Mina y Metasedimentarias Esquistosas. De acuerdo con INGEOMINAS (2003), el Complejo Arquía ha sufrido un único evento metamórfico regional prógrado y todas las unidades del complejo sufrieron metamorfismo en condiciones de baja a media presión desde facies esquistos verde de baja temperatura a facies anfibolita, con varios eventos dinámicos y metamorfismo de contacto local. El origen de la Dunita Serpentinizada de Muñoz y de la unidad Anfibolita y Metagabro de San

Antonio se interpreta como restos de secuencias afinidad ofiolítica y las meta-sedimentitas esquistasas como rocas depositadas en una fosa. El metamorfismo que presentan estas rocas es del tipo bórico de media presión generado en una antigua zona de subducción.

Desde el punto de vista estructural el área de estudio se encuentra en la región morfoestructural occidental de la plancha 343 Silvia (INGEOMINAS, 2003) que está limitada al este por la falla San Jerónimo que hace parte del sistema de fallas Cauca-Romeral y coincide con el flanco occidental de la cordillera (Figura 5) . Su morfología es abrupta, y constituye un anticlinorio caracterizado por una tectónica de bloques que envuelve rocas de los complejos Quebradagrande y Arquía.

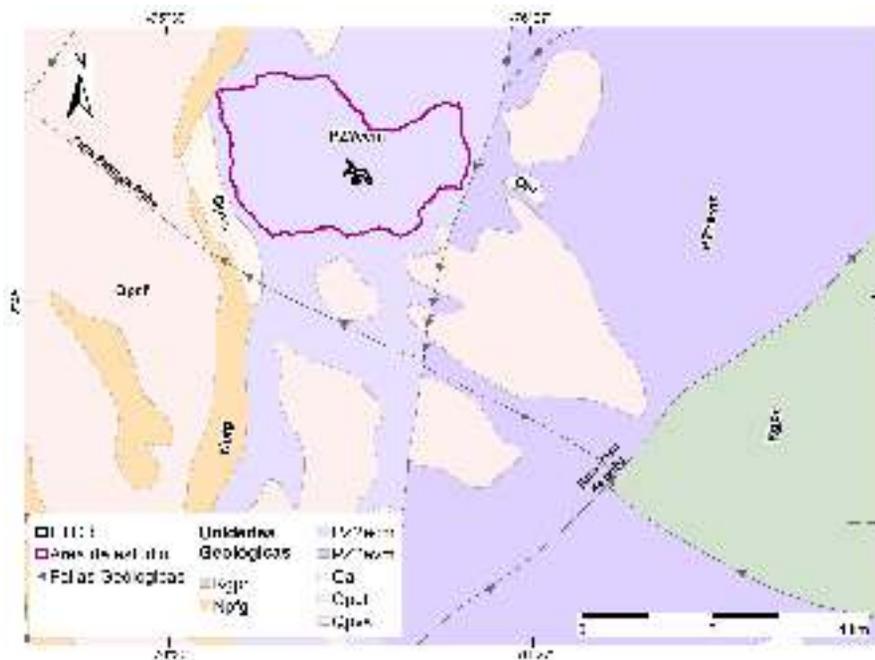


Figura 5: Mapa litoestructural predio Los Monos

Desde el punto de vista geomorfológico en la zona de estudio se presentan geoformas pertenecientes a un ambiente estructural (Figura 6) cuya morfogénesis está ligada a procesos relacionados con la dinámica interna de la Tierra asociados principalmente al plegamiento y el fallamiento de las rocas.

En el caso del predio los Monos asociado a la falla cauca-romeral, donde la expresión morfológica es definida por la tendencia y la variación en la resistencia de las unidades (SGC, 2014). Las geoformas que comprenden el área de estudio son laderas contrapendiente (Slcp) descrita como superficie en declive, de morfología colinada regular, definida por planos de foliación y diaclasamiento

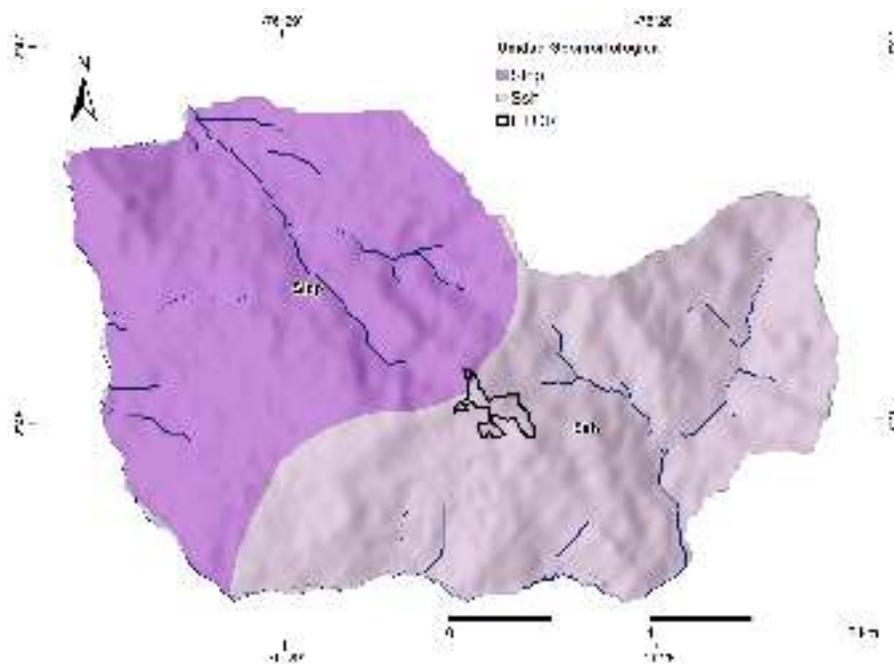


Figura 6: Mapa Geomorfológico 1:100.000 predio Los Monos

dispuestos en sentido contrario a la inclinación del terreno. Se presenta con longitud larga a muy larga y con pendientes abruptas ( $16^\circ - 20^\circ$ ) a muy abruptas ( $21^\circ - 30^\circ$ ) Figura 7).



Figura 7: Panorámica unidad de ladera de alta pendiente en el Noroeste de la zona de estudio

La erosión y meteorización en esta unidad es moderada haciendo susceptible la unidad a movimientos en masa tipo deslizamiento traslacional y rotacional. También se encuentran sierras homoclinales (Ssh) descritas como prominencia

topográfica ligeramente simétrica elongada, con foliación ( $35^\circ$ ), inclinada en una misma dirección; de morfología colinada, de cimas agudas y laderas moderadamente largas a muy largas. Geoformas muy disectadas por drenaje dendrítico, subdendrítico, paralelo y subparalelo (Figura 8).



Figura 8: Panorámica unidad de ladera de morfología colinada, de cimas agudas y laderas moderadamente largas a muy largas

## 1.5. Condiciones de lluvia del área de estudio

El estudio y análisis de la precipitación es una herramienta fundamental para el conocimiento de procesos morfodinámicos dominantes en la zona. Este estudio se realiza a partir de dos fuentes de datos de precipitación, uno de las estaciones pluviométricas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), con el objeto de conocer la precipitación medida sobre la superficie, y de los datos de precipitación estimada por el satélite CHIRPS v2p0 (*Climate Hazards center InfraRed Precipitation with Station data*) a cargo y desarrollado por UC Santa Barbara (UCSB) y la NASA. Con la información recolectada se desea conocer el comportamiento y variabilidad de la lluvia a nivel de cuenca a diferentes escalas temporales y espaciales.

### 1.5.1. Variación temporal

A continuación se presenta el análisis multitemporal de la variable precipitación en el área de influencia del antiguo ETCR Los Monos, utilizando las

estaciones del IDEAM y los datos del CHIRPS.

### 1.5.1.1. Datos estaciones pluviométricas IDEAM

Se tomaron las estaciones pluviométricas del IDEAM más cercanas al área de estudio del antiguo ETCR-Los Monos, las cuales son mostradas en la Tabla 1 y su ubicación se visualiza en la Figura 9.

La Tabla 1 presentan los datos de la estación utilizada y el porcentaje de datos faltantes. Los datos faltantes son completados con la última observación válida vecina registrada.

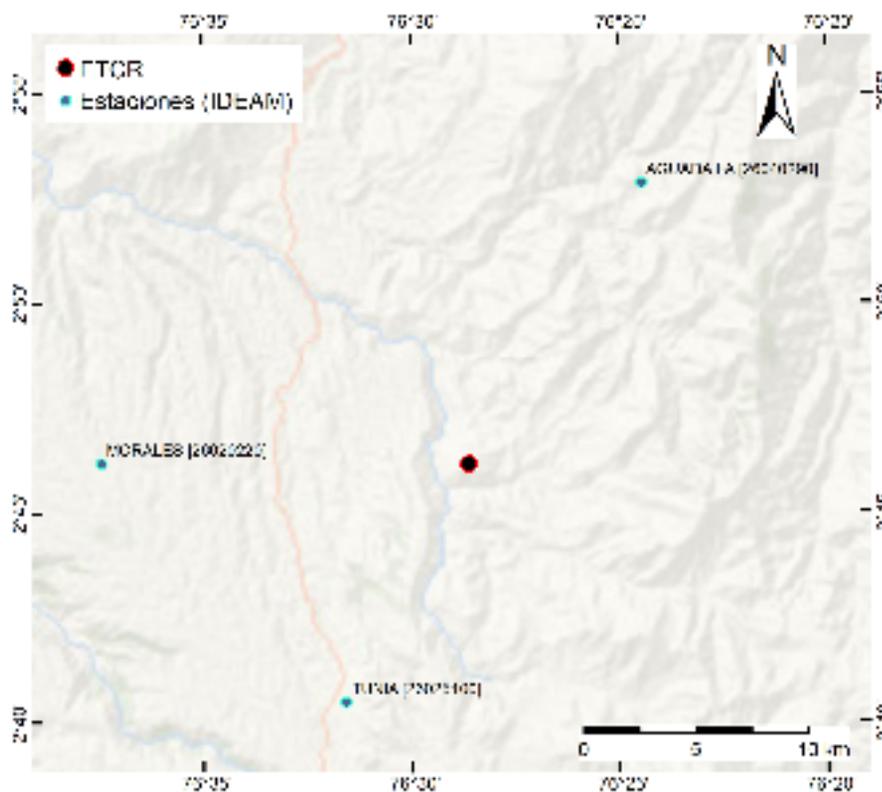


Figura 9: Estaciones IDEAM cercanas al ETCR-Los Monos

Tabla 1: Estaciones pluviométricas del IDEAM cercanas al antiguo antiguo ETCR-Los Monos.

Estación	Código	Inicio del registro	Datos faltantes (%)
AGUADA LA	26040290	1973-08-01	2,7
TUNIA	26025100	1989-06-23	3,8
MORALES	26020220	1971-04-01	2,9

**Precipitación diaria multianual IDEAM.** Los datos de precipitación se analizaron en diferentes escalas temporales como se mencionó anteriormente.

Los resultados mostrados en esta sección hacen referencia al análisis de las precipitaciones diarias multianuales, donde se busca los valores medios y máximos para cada uno de los días, los resultados se muestran en las Figuras 10, 11 y 12, donde la línea azul pálida representa la precipitación máxima diaria multianual (PDMax), la línea azul oscuro es la PDMax con promedio móvil de 5 días (PDMA), la línea negra pálida son los datos de precipitación media diaria multianual (PDMean) y la línea negra representa PDMean con promedio móvil de 5 días (PMDMA).

Dentro de los resultados obtenidos se puede evidenciar que, los valores de precipitación máxima en la estación morales (Figura 11) y La Aguada (Figura 12) van desde los 10 a los 120 mm/día y en lo que respecta a la precipitación media diaria multianual, esta oscila al rededor de los 7, 1 y 5, 19 mm/día, respectivamente, por otro lado, la estación Tunia (Figura 10) reporta que los valores máximos de precipitaciones diarias multianuales oscilan entre 20 a 120 mm/día y precipitación media diaria multianual, varía al rededor de los 6, 1 mm/día. Los valores máximos de la precipitación se ubican en las gráficas a principios del año, a mediados del mes de abril y mayo, y los últimos picos a finales del año entre los meses de octubre y noviembre.

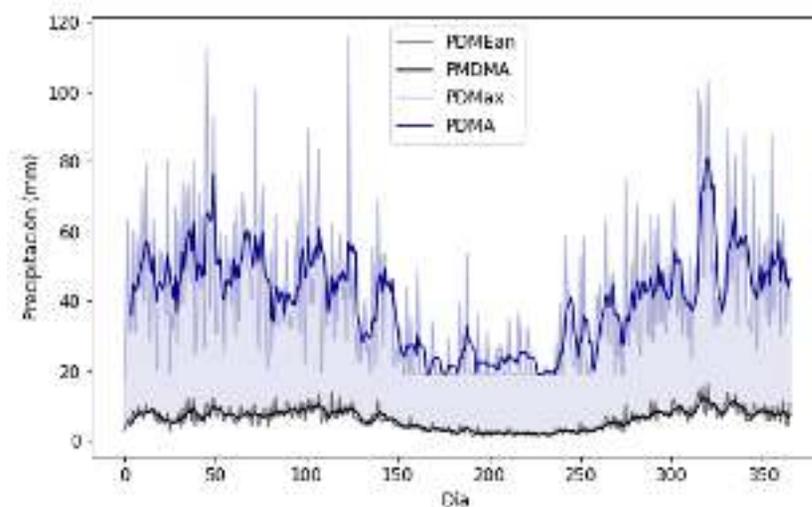


Figura 10: Precipitación diaria multianual estación Tunia

**Precipitación mensual multianual con estaciones IDEAM.** Los resultados obtenidos para cada una de las estaciones, se encuentran en las Figuras 13, 14 y 15.

De lo obtenido de las precipitaciones medias multianuales en todas las estaciones, se puede entender que las precipitaciones sobre el territorio son bimo-

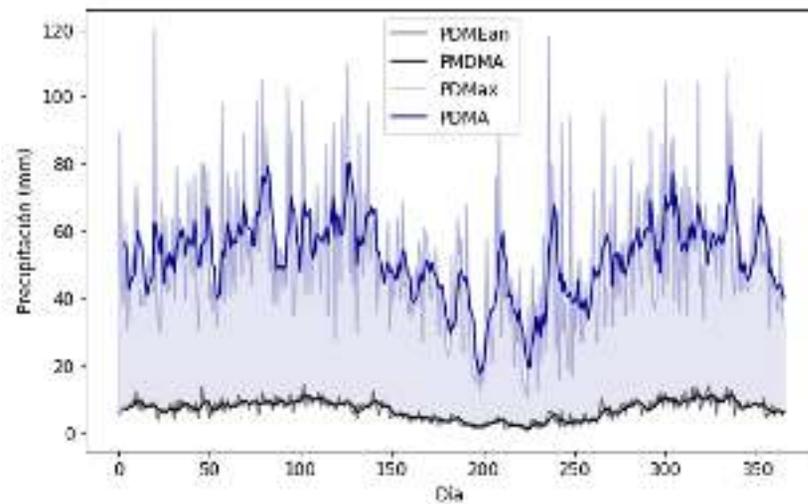


Figura 11: Precipitación diaria multianual estación Morales

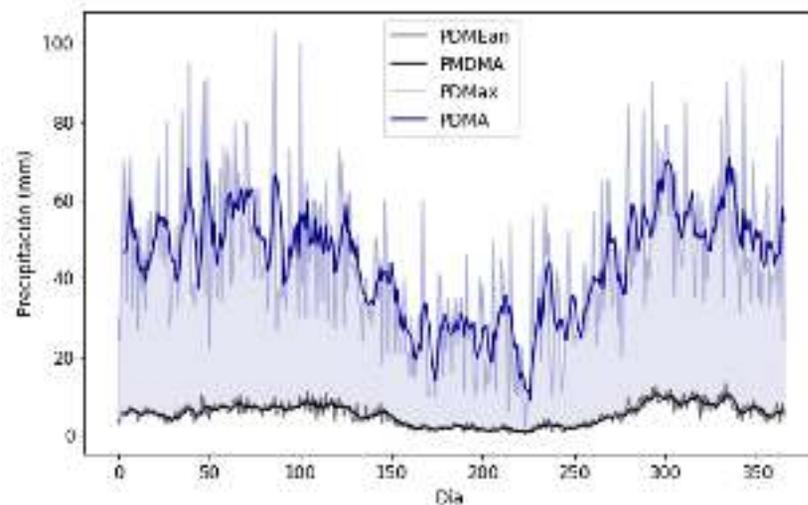


Figura 12: Precipitación diaria multianual estación La Aguada

dales, con periodos fuertes de sequía durante los meses junio, julio y agosto, igualmente se presenta disminuciones, no tan intensas, de la precipitación en los meses Diciembre, enero y febrero, durante estos meses las precipitaciones medias mensuales pueden estar alrededor de los 200mm/mes. Por otro lado, se presentan dos temporadas de lluvia, los cuales son marzo, abril, mayo y septiembre, octubre y noviembre, donde se pueden alcanzar precipitaciones medias mensuales de de hasta 500-600mm/mes. Así mismo, se puede observar que para la estación que las precipitaciones máximas oscilan entre los 300 a 700 mm/mes para la estación Tunia, entre los 200 a 500 mm/mes para la estación La Agauda y entre los 200 a 700 mm/mes para la estación Morales, así se puede

determinar que al rededor de la estación Tunia y Morales es donde se pueden presentar las mayores precipitaciones a escala mensual. Por otro lado se tiene que, las precipitación media mensual multianual puede variar al rededor de los 184, 5 , 213, 7 y 157, 7 mm/mes para las estaciones Tunia, Morales y La Aguada, respectivamente.

Analizando los resultados mostrados en las Figuras 13B, 14B y 15B sobre la precipitación media mensual multianual en periodos EL Niño y La Niña, se tiene que, para los meses de Abril a junio y de Septiembre a Noviembre, en todas las estaciones, no se evidencias anomalías de precipitación por la ocurrencia de un evento El Niño o La Niña, por otro lado, en el resto de los meses se evidencia un aumento de las precipitaciones cuando ocurre La Niña, a excepción de lo reportado en la estación Tunia que evidencia un efecto opuesto en los meses que van de Junio a Septiembre.

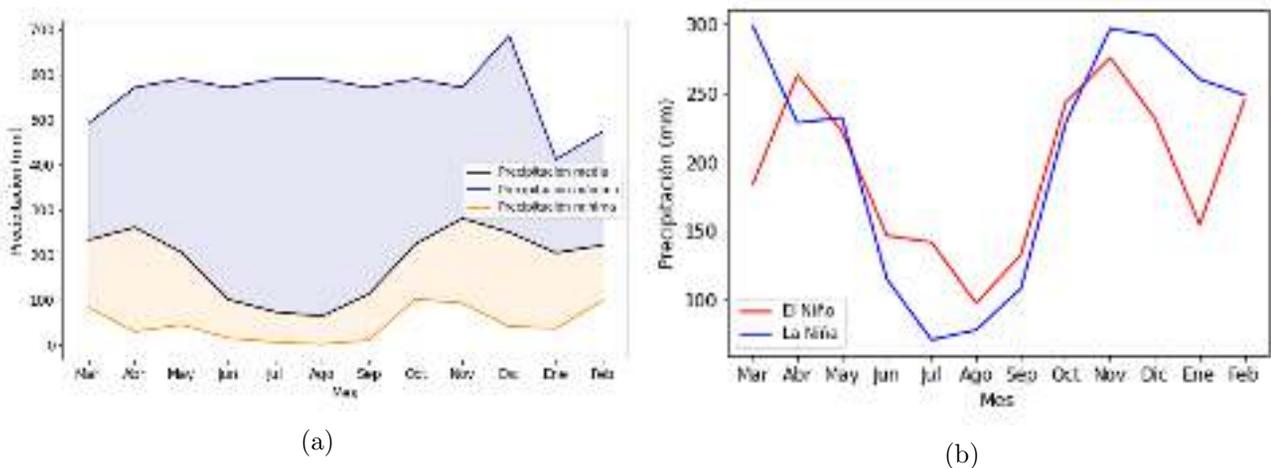


Figura 13: Precipitación mensual multianual para la estación La Tunia, A)Valores medios, máximos y mínimos. B)Precipitación media mensual multianual para meses con ocurrencia del El Niño y La Niña

**Precipitación Anual con estaciones IDEAM.** El ENSO es un fenómeno natural del estado de la atmósfera y el océano sobre el pacífico central (NOAA, 2020). Este tiene influencias sobre las anomalías hidrológicas en Colombia, es decir, se presentan anomalías negativas de precipitación y afluencias durante eventos El Niño y lo opuesto cuando se atraviesa por periodos La Niña (Poveda y Mesa, 2015). Para evaluar la influencia del ENSO se utiliza el *The bi-monthly Multivariate El Niño/Southern Oscillation index* (MEI), el cual acopla variables tales como presión del nivel del mar, temperatura superficial del mar, vientos zonales y meridionales y la radicación de onda larga saliente (NOAA, 2020);

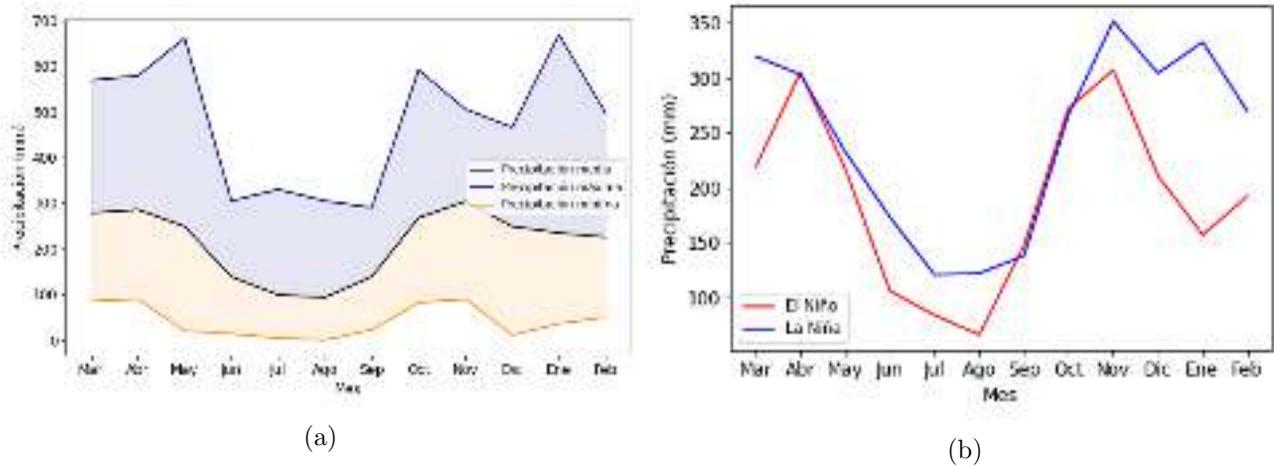


Figura 14: Precipitación mensual multianual para la estación Morales, A)Valores medios, máximos y mínimos. B)Precipitación media mensual multianual para meses con ocurrencia del El Niño y La Niña

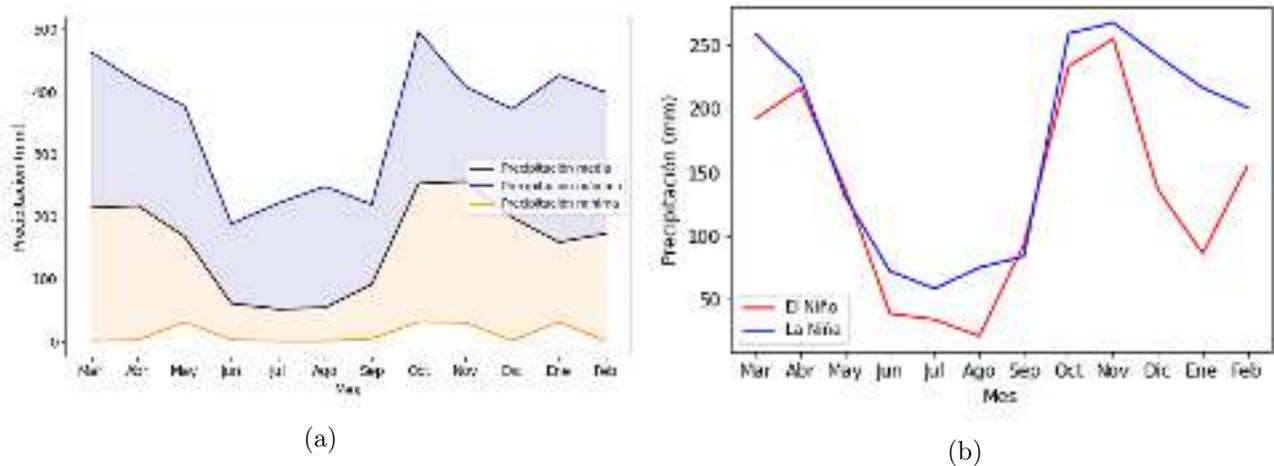


Figura 15: Precipitación mensual multianual para la estación La Agauda, A)Valores medios, máximos y mínimos. B)Precipitación media mensual multianual para meses con ocurrencia del El Niño y La Niña

dependiendo de las anomalías en las variables mencionadas, este índice determina los meses de ocurrencia El Niño, La Niña o Neutro. Por otro lado, para establecer estas condiciones pero a escala anual, se procede a clasificar cada año utilizando la frecuencia de cada fase según el MEI.

El ENSO es un acontecimiento cuasi-periódico con una frecuencia, en promedio, cuatrianual (Poveda y Mesa, 2015), por tanto, estudiar las precipitaciones anuales nos permite observar la recurrencia del evento y los cambios producidos en las precipitaciones a escala anual. Los resultados para cada una de las estaciones, se presentan en las Figuras 16, 17 y 18. En el resultado obtenido, se

puede evidenciar la periodicidad de los eventos El Niño y La Niña. Referente a las particularidades en cada estación, se tiene que, para la estación Tunia Figura 16, la máxima precipitación alcanzada, a escala anual, es de alrededor de los 5.000 mm/año, pero es importante resaltar que, la ocurrencia de estas precipitaciones máximas no son atribuidas a la ocurrencia de un periodo La Niña, debido a que, según el MEI, este año es determinado como periodo El Niño, por el contrario, se tiene que las precipitaciones mínimas anuales pueden llegar a ser alrededor de los 1.000 mm/año, pasa lo mismo que en el caso anterior las bajas precipitaciones no se le pueden atribuir al fenómeno del niño, ya que según el MEI, este año es determinado como periodo de La Niña y por último se tiene que, el promedio de las precipitaciones anuales son de 2.221 mm/año. En lo que respecta a la estación Morales (Figura 17), las precipitaciones máximas a escala anual pueden llegar a ser superiores a los 3.500 mm/año y este coincide con la ocurrencia de periodos La Niña, las precipitaciones mínimas anuales son al rededor de los 1.000 mm/año que esta en un año determinado como neutro y el promedio de las precipitaciones en el año puede ser del orden de 2.580 mm/año. Por otro lado, en la estación La Aguada (Figura 18) la máxima precipitación anual reportada es de alrededor de los 2.500 mm/mes que, las precipitaciones mínimas son de 500 mm/año aproximadamente en año neutro y las precipitación media anual es de 1.896,79 mm/año.

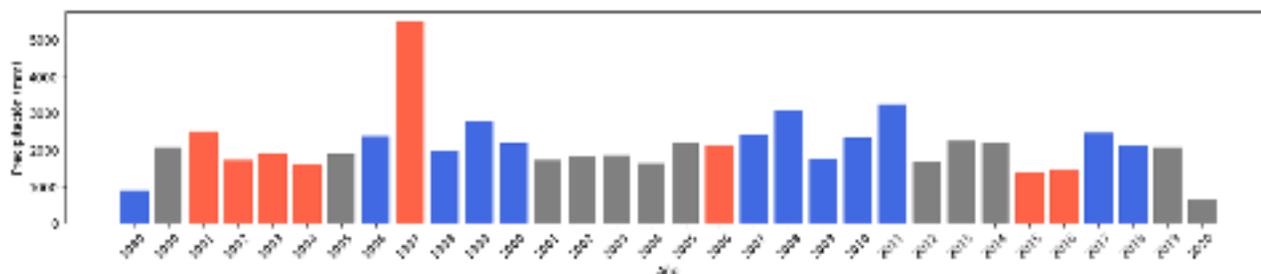


Figura 16: Precipitación anual multianual de la estación Tunia, donde, las barras color rojo representan la ocurrencia de El Niño, el color azul La Niña y el gris periodos Neutros.

### 1.5.1.2. Datos estimados por satélite CHIRPS

Además del uso de los datos pluviométricos de IDEAM se ejecutó el análisis de la precipitación estimada por satélite. Una de las ventajas de CHIRPS es su registro de datos de estimación de la precipitación para todo el planeta desde 1981 hasta la actualidad y su resolución espacial con celdas de 5,5km, el cual es de los insumos de lluvia satelital más detallados.

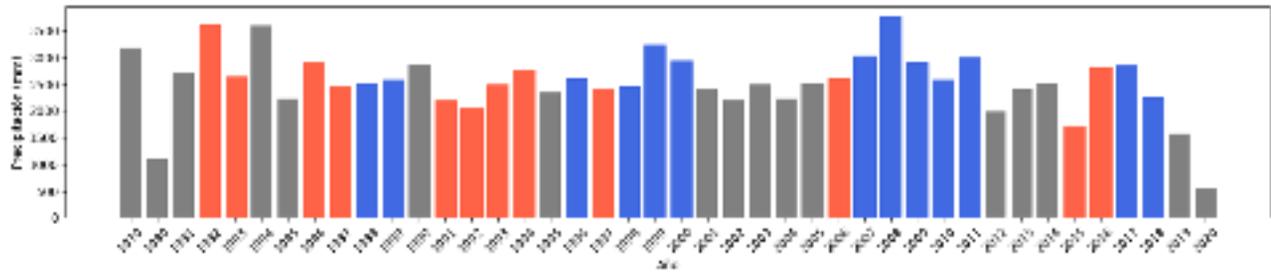


Figura 17: Precipitación anual multianual de la estación Morales, donde, las barras color rojo representan la ocurrencia de El Niño, el color azul La Niña y el gris periodos Neutros.

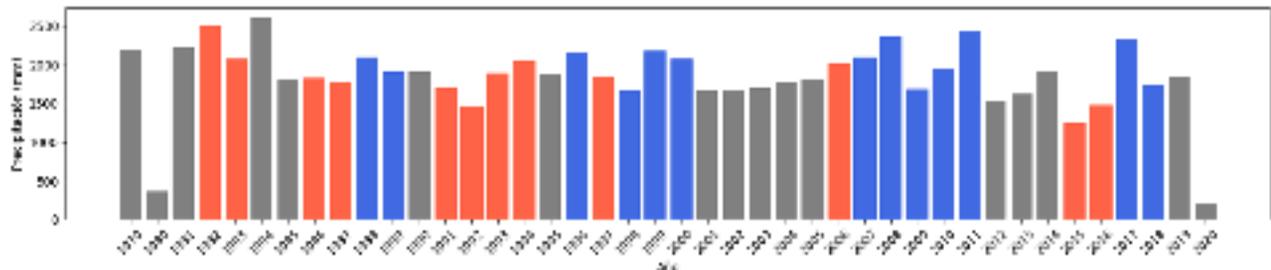


Figura 18: Precipitación anual multianual de la estación La Aguada, donde, las barras color rojo representan la ocurrencia de El Niño, el color azul La Niña y el gris periodos Neutros.

A partir del procesamiento realizado en la plataforma de *Google Earth Engine* se elaboró un algoritmo en dicha plataforma para conocer la cantidad de lluvia que el satélite CHIRPS estima se precipita sobre la cuenca donde se encuentra el antiguo ETCR, desde el año 1981 hasta el 2020. Es importante aclarar que en este caso, el código mencionado, agrega la precipitación distribuida de toda la cuenca a un solo valor, esto permite realizar cálculos del comportamiento de la precipitación en distintas escalas de tiempo (diarias, mensuales y anuales), similar al elaborado para la estación del IDEAM. Cabe resaltar que se hace el uso de las dos herramientas con fines complementarios en el análisis de lluvia para aproximarse desde diferentes fuentes al comportamiento de las variaciones climáticas en el área de estudio, esto permite profundizar más en el conocimiento de la amenaza por torrencialidad y establecer umbrales y sistemas de alerta temprana para la zona, como medidas no estructurales que mitigan las condiciones de riesgo.

**Precipitación diaria multianual CHIRPS.** Los resultados mostrados en la Figura 19 hacen referencia al análisis de las precipitaciones diarias multi-  
 anuales. Se puede evidenciar que según los datos registrados por CHIRPS, las precipitaciones máximas (la línea color azul opaco) se encuentra alrededor de

los 140 mm/día y la precipitación media (línea negra opaca) puede oscilar alrededor de los 2-10 mm al día.

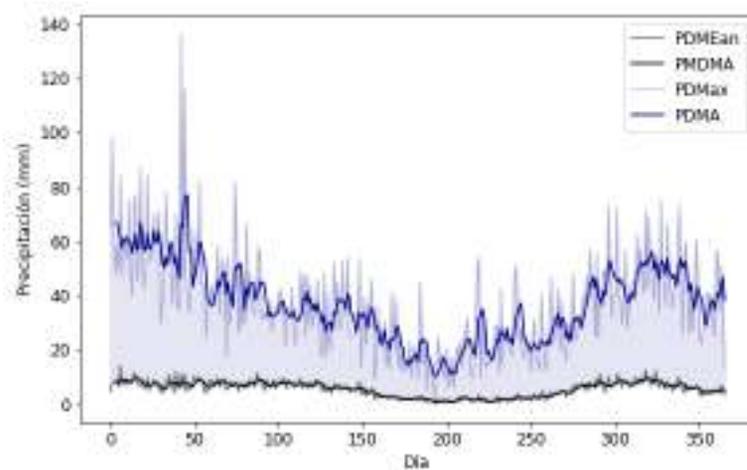


Figura 19: Precipitación diaria multianual estimación CHIRPS a nivel sobre el área de estudio

**Precipitación mensual multianual CHIRPS.** La Figura 20a señala que las precipitaciones sobre el territorio son bimodales, con dos periodos de altas precipitaciones en febrero, marzo, abril y mayo con lluvias de aproximadamente 70mm/mes en el mes de mayo y un segundo pico en los meses de septiembre, octubre y noviembre donde, en promedio, se superan se pueden superar los 200 mm/mes. En lo que respecta a las máximas precipitaciones a escala mensual, estas pueden llegar a exceder los 400 mm /mes; por otro lado, las precipitaciones mínimas pueden llegar a ser del orden de los 20 mm/mes. Igualmente se analiza los meses de ocurrencia de El Niño y La Niña 20b donde se puede apreciar que en general los eventos macro-climáticos no tienen incidencias evidentes sobre el régimen de precipitación, a excepción a de los meses de Enero y Febrero, donde se puede apreciar que las precipitaciones pueden incrementar en la ocurrencia de un evento La Niña.

**Precipitación Anual CHIRPS.** La Figura 21 señala los valores de lluvia anual, registrados por CHIRPS, los cuales oscilan entre 1500 a 3000mm/año. Por otro lado, se puede visualizar que, a escala anual, la incidencia de La Niña, se manifiesta en un leve aumento de las precipitaciones sobre la zona.

### 1.5.2. Correlación IDEAM-Chirps

Teniendo en cuenta que existen distintas fuentes de información para la precipitación, se evaluó la correlación entre la estación del IDEAM y CHIRPS para la zona de estudio. Por tanto, se procede a tomar los datos dados por CHIRPS,

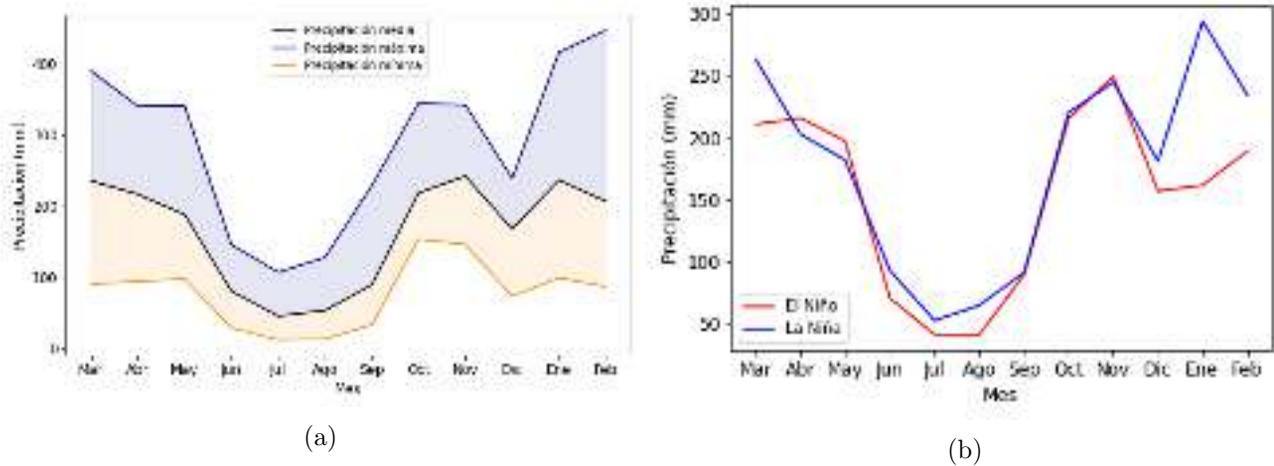


Figura 20: Precipitación mensual multianual CHIRPS sobre el área de estudio, a) Valores medios, máximos y mínimos. b) Precipitación media mensual multianual para meses con ocurrencia del El Niño y La Niña

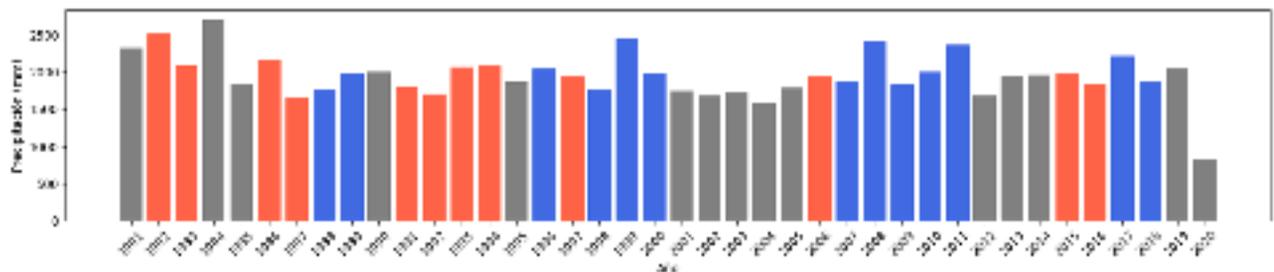


Figura 21: Precipitación anual multianual CHIRPS sobre el área de estudio, donde, las barras color rojo representan la ocurrencia de El Niño, el color azul La Niña y el gris periodos Neutros.

en la ubicación exacta donde se encuentra el pluviómetro del IDEAM y se compara con los datos registrados en la estaciones Aguada La, Tunia y Morales, agregando los datos a escala diaria, mensual y anual.

Los resultados a escala diaria son mostrados en la Figura 22, y se visualiza que, en todas las estaciones, no existe una correlación definida entre las variables, más específicamente se tiene que, el coeficiente de correlación de Pearson entre CHIRPS y las estaciones es de 0,23, 0,22 y 0,23 para las estaciones LaAguada, Tunia y Morales respectivamente, lo cual respalda lo evidenciado en la Figura 22.

En lo que respecta a los resultados de la correlación a escala mensual, como se puede observar en las Figura 23, se evidencia una relación muy representativa entre los resultados brindados por el IDEAM y CHIRPS, esto es respaldado por los resultados del coeficiente de correlación de Pearson donde se posee valores de 0,9, 0,7 y 0,8 para las estaciones La Aguada, Tunia y Morales, respectivamente.

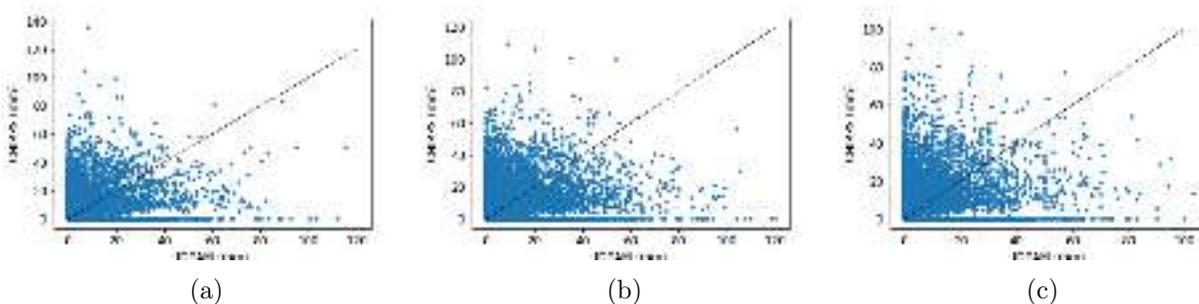


Figura 22: Correlación de la información a escala diaria dada por los pluviómetros del IDEAM y CHIRPS en las estaciones A) Tunia, B) Morales y C) La Aguada.

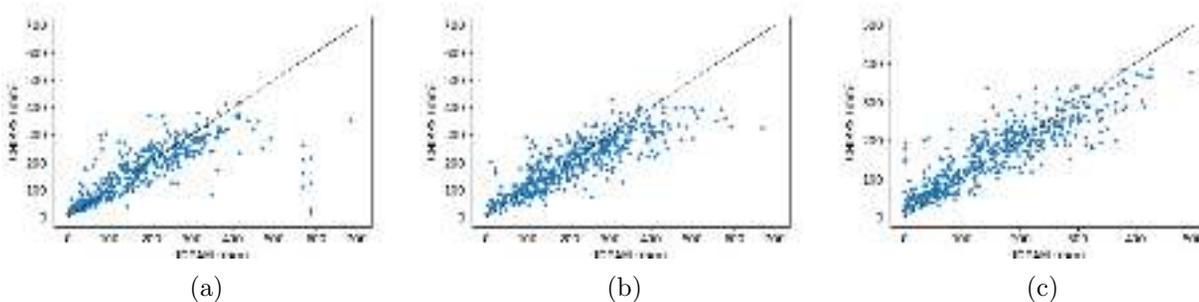


Figura 23: Correlación de la información a escala mensual dada por los pluviómetros del IDEAM y CHIRPS en las estaciones A) Tunia, B) Morales y C) La Aguada.

La comparación de la información brindada por CHIRPS y el IDEAM a escala anual, se evidencia en las Figuras 24, donde, se observa cierta correspondencia ente los datos, para determinar como es su relación, se buscan los resultados del coeficiente de correlación de Pearson, los cuales son 0,9, 0,46 y 0,85 para las estaciones LaAguada, Tunia y Morales, respectivamente, por tanto se puede determinar que a escala mensual, se tiene correlaciones significativas para las estaciones La Aguada y Morales.

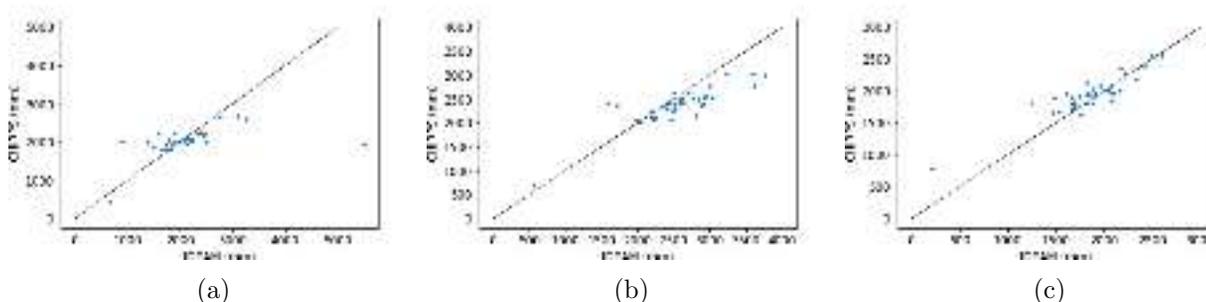


Figura 24: Correlación de la información a escala anual dada por los pluviómetros del IDEAM y CHIRPS en las estaciones A) Tunia, B) Morales y C) La Aguada.

### 1.5.3. Variación espacial

La información satelital permite evaluar cuál es la distribución espacial de las precipitaciones sobre la zona de estudio, esto debido a que el número de estaciones del IDEAM no son representativas para poseer un conocimiento certero de como cambian a nivel espacial las precipitaciones en el sitio de interés. Por tanto, se evalúa la distribución espacial de las precipitaciones, a distintas escalas de tiempo, utilizando la información brindada por CHIRPS sobre la cuenca, especialmente a escala mensual y anual de acuerdo con los resultados anteriores.

Para el área de estudio del antiguo ETCR Los Monos no se pudo realizar el análisis espacial de lluvia satelital CHIRPS debido a que el tamaño del área de estudio era mucho inferior a resolución espacial del satélite que es de  $5,5km^2$  y el zona de estudio posee un área de  $6,6km^2$ , por tanto, solo toma el valor de una celda, impidiendo tener una comprensión de como se distribuye las precipitaciones espacialmente.

## 1.6. Información secundaria

### 1.6.1. Estudios previos

Teniendo en cuenta el área de estudio y el alcance del proyecto, se realizó una exhaustiva búsqueda de información secundaria existente de la región y el municipio. A continuación se describen de forma general, los estudios de mayor importancia para el municipio de Caldon:

- **Plan municipal de gestión del riesgo de desastres CMGRD (2014).** Este documento permite conocer los diferentes eventos que involucran riesgo o amenaza a lo largo del territorio municipal de Caldon, es decir, en sus diferentes veredas. Describe de forma general los eventos ocurridos en la región y la susceptibilidad. El riesgo, según el documento, se presenta por características específicas, como por ejemplo, el tipo de suelo, la influencia del sistema de fallas Romeral, los veranos e inviernos fuertes y prolongados y el relieve montañoso. Los eventos que se registran en el documento son movimientos en masa, avenidas torrenciales, procesos erosivos, vendavales e inundaciones. Además se habla de las afectaciones que sufrió el municipio o la vereda, a causa del evento.
- **Plan municipal de gestión del riesgo de desastres de Administra-**

**ción Pública y cols. (2017).** En el documento se describe con detalle los eventos de riesgo para todo el municipio de Caldon; se exponen los escenarios de riesgo por diferentes eventos como las avenidas torrenciales, movimientos en masa, vendavales e inundaciones y su relación de afectados. Además, se mencionan los cauces principales de cada vereda y la subcuenca a la cual pertenecen, de igual modo, sus respectivas corrientes tributarias.

- **Memoria explicativa de la Zonificación de la Susceptibilidad y la amenaza relativa por Movimientos en masa escala 1:100.000 Plancha 343 – Silvia.** SGC y UIS (2014) La plancha 343 con un área de 2400 Km<sup>2</sup> comprende los departamentos del Cauca y Huila, situándose principalmente sobre el Nudo Cordillerano Andino, en el, nacen las cordillera Central y Occidental así como los dos principales ríos de país, el río Cauca y el río Magdalena. Sobre toda esta configuración del relieve se encuentra este estudio de zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa, el cual permitió generar una serie de mapas basados en variables cualitativas (geología, geomorfología, suelos y cobertura) y cuantitativas (pendiente, longitud de la pendiente, rugosidad y variables referidas a la cuenca) extraídas de modelos digitales de elevación y en conjunto con los otros insumos disponibles como cartografía básica en escala 1:100.000, imágenes satelitales (LandSat y Spot), fotografías aéreas (escala promedio 1:40000), entre otros, permitiendo aplicar una metodología heurística propuesta por el SGC a las variables en mención. A partir de las variables citadas, se realiza un análisis multicriterio que involucra la utilización de datos geográficos, debiendo establecer las preferencias y combinaciones (o agregaciones) de los datos, de acuerdo a reglas de decisiones específicas articulando métodos heurísticos establecidos que se basan en categorizar y ponderar los factores causantes de inestabilidad según la influencia esperada de éstos en la generación de movimientos en masa. Involucrando factores detonantes de tipo climático y sísmico, se generó la zonificación de amenaza, definiéndose para esta plancha cuatro categorías de amenaza: baja, media, alta y muy alta. En la zona se pudo establecer que cerca de 46,2 % del área que abarca la plancha representa un grado de amenaza alta. Las categorías de amenaza muy alta presenta 7,4 %, la media 46,1 % y la amenaza baja 0,26 % del total de la plancha. Una vez se obtuvieron estos rangos de amenaza, se realizó un registro en mapas que permitió establecer una herramienta básica para los tomadores de decisiones departamentales

y las Corporaciones Autónomas Regionales (Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC) y Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM)) encargados de la gestión y prevención de desastres, planes de desarrollo y ordenamiento territorial del área estudiada.

### 1.6.2. Información Cartográfica

Para los Estudios Básicos de Amenaza se utilizaron los modelos digitales de elevación disponibles de la misión ALOS PALSAR de la Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa (JAXA) en colaboración con la Administración Nacional Espacial y Aeronáutica (NASA) (<https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/>). El satélite ALOS durante su operación (May 16, 2006 – April 22, 2011), colectó imágenes de radar en escenas de 50 km x 70 km de todo el planeta cada 45 días aproximadamente a través de su sensor PALSAR (*Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar*). Las imágenes PALSAR están disponibles según 3 niveles de procesamiento con correcciones de terreno y radiométrico (1.0-Imagen Cruda, 1.1-Datos comprimidos o 1.5-Imagen expandida) en formato CEOS con una resolución radiométrica de 16 bits.

Para la región ecuatorial donde se encuentra Colombia, entre latitudes 60°N y 57°S, la mejor resolución espacial disponible por la misión es de 12,5 m del modelo denominado SRTMGL1 en formato geotiff y con datum EGM96 (*Earth Gravitational Models*), el cual utilizado por el geoide de referencia del WGS (*World Geodesic System*).

En términos de imágenes satelitales disponibles, se utilizaron las misiones de observación terrestre *Sentinel* de la Agencia Espacial Europea y *Landsat* de la Administración Nacional Espacial y Aeronáutica (NASA) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Estas imágenes se obtuvieron y procesaron a través de la herramienta *Google Earth Engine* (<https://earthengine.google.com/>)

Sentinel-1 (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>) es una misión que se compone de una constelación de dos satélites, Sentinel-1A y Sentinel-1B, que comparten el mismo plano orbital y fue lanzada en el año 2014. Estos satélites operan día y noche un radar de apertura sintética (SAR) de la banda C y proporcionan imágenes sin importar el clima o la nubosidad presente. Cada escena capturada cuenta con cuatro bandas de polarización que permiten las combinaciones VV: co-polarización sencilla del transmisor vertical con el receptor vertical, HH: co-polarización sencilla del transmisor horizontal

con el receptor horizontal, VV + VH: polarización cruzada de doble banda del transmisor vertical con el receptor horizontal y HH + HV: polarización cruzada de doble banda del transmisor horizontal con el receptor vertical (ESA, 2020; GoogleEarthEngine, 2020b).

De esta misión para la zona de estudio se cuenta con registro desde el año 2014 y se obtienen imágenes anuales procesadas en la plataforma *Google Earth Engine* de la cual se presenta una imagen representativa en la Figura 25 correspondiente al año 2020.

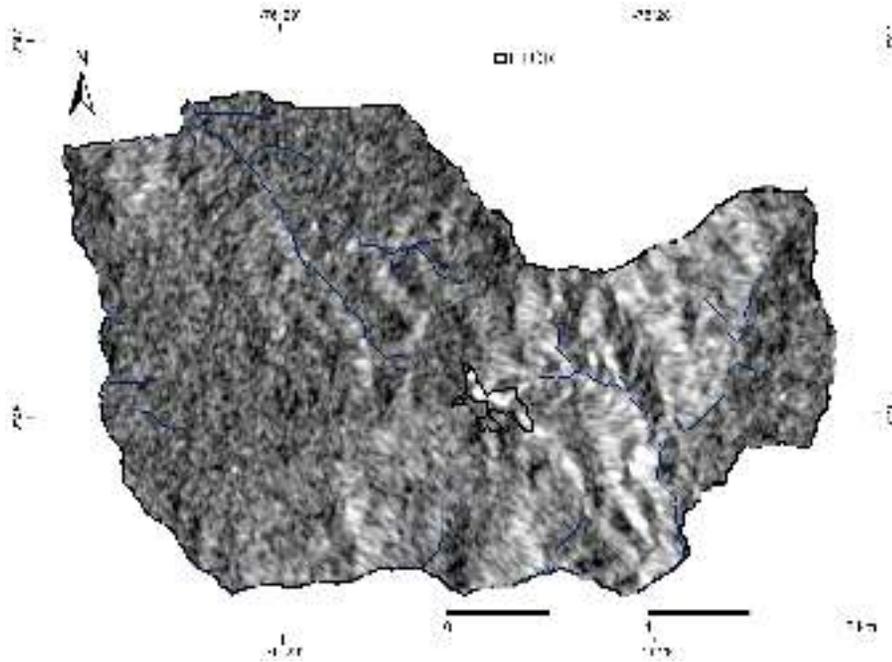


Figura 25: Imagen satelital representativa de la misión Sentinel 1 del año 2020.

Sentinel-2 (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>) es una misión multispectral lanzada en el año 2015 que se compone de 13 bandas. Las primeras cuatro son las bandas del espectro visible: azul (450-520 nm), verde (540-570 nm) y rojo (650-680 nm) y el infrarrojo cercano (780-900 nm) que tienen una resolución espacial de 10 m. Adicionalmente presenta cuatro bandas en el infrarrojo visible y cercano (VNIR; 690-710 nm, 730-740 nm, 770-790 nm y 850-870 nm) y dos bandas de infrarrojo de onda corta (SWIR; 1.560-1.650 nm y 2.100-2.280 nm) para aplicaciones como nieve, hielo y detección de nubes o evaluación de la humedad de la vegetación con resolución espacial de 20 m. Y, finalmente, tres bandas de 60 m de resolución espacial centradas en la detección de nubes y corrección atmosférica para aerosoles (430-450 nm), vapor de agua (930-950 nm) y detección de cirros (1.360-1.390 nm) (ESA,

2020; GoogleEarthEngine, 2020b).

De esta misión para la zona de estudio se cuenta con registro desde el año 2018 y se obtienen imágenes anuales procesadas en la plataforma *Google Earth Engine* para reducir su cobertura de nubes y se presenta una imagen representativa en la Figura 26 correspondiente al año 2019.

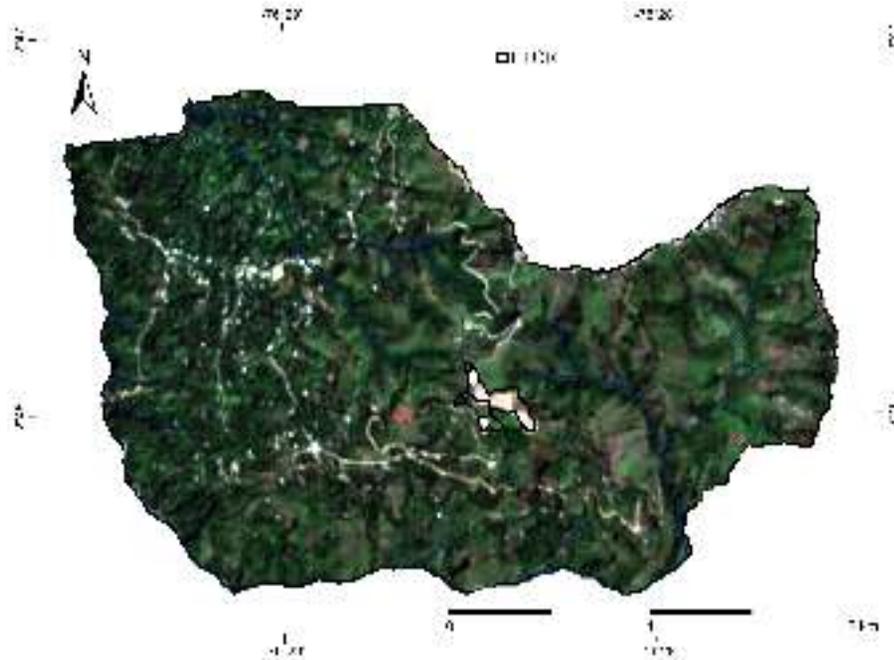


Figura 26: Imagen satelital representativa de la misión Sentinel 2 del año 2019.

En cuanto al programa Landsat (<https://landsat.gsfc.nasa.gov/>), se cuenta con imágenes de los satélites Landsat 8, Landsat 7, Landsat 5 y Landsat 4, donde se cuenta con bandas del espectro visible: azul (452-512 nm), verde (533-590 nm) y rojo (636-673 nm), además del infrarrojo cercano (851-879 nm) y dos bandas de infrarrojo de onda corta (1.566-1.651 y 2.107-2.294 nm) con resolución espacial de 30 m. Además, cuenta con una banda pancromática (503-676 nm) con resolución de 15 m y dos bandas térmicas (10.600-11.190 y 11.500-12.510 nm) con resolución de 100 m (GoogleEarthEngine, 2020a; NASA, 2020).

De Landsat 8 se cuenta para la zona de estudio con registros desde el año 2013 procesadas en la plataforma *Google Earth Engine* para reducir su cobertura de nubes. La Figura 27 corresponde a una imagen del año 2019 que cubre el antiguo ETCR Los Monos.

En cuanto al satélite Landsat 7 se cuenta con imágenes de la zona de estudio desde el año 1999, sin embargo esta misión cuenta con un defecto en el Corrector de Línea de Escaneo (SLC, por sus siglas en inglés) que genera un

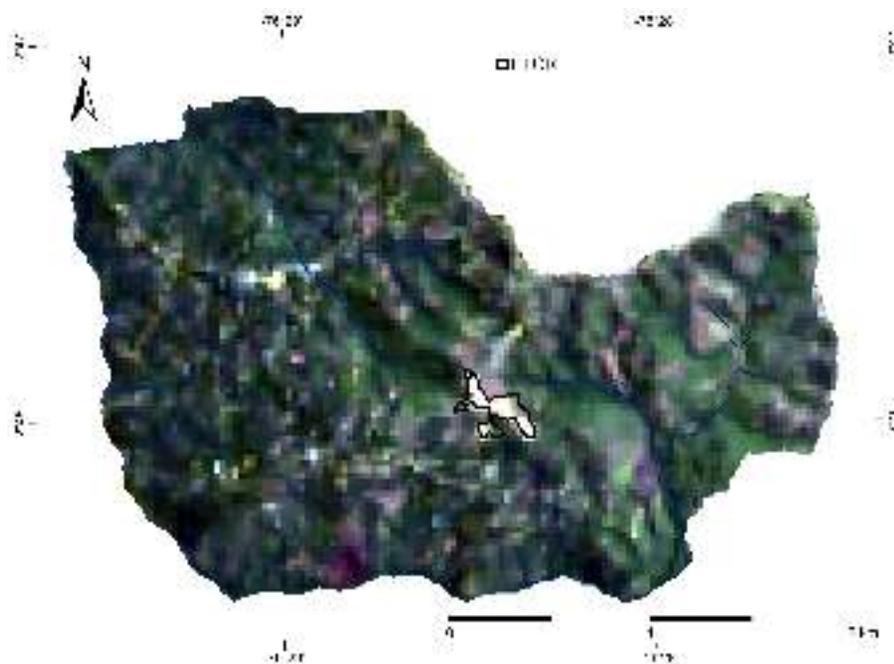


Figura 27: Imagen satelital representativa de la misión Landsat 8 del año 2019.

bandeamiento sobre sus productos (GoogleEarthEngine, 2020a; NASA, 2020). Del satélite Landsat 5 se cuenta con registro del antiguo ETCR Los Monos desde el año 1984 hasta el año 2011, aunque no de forma continua. Finalmente, del Landsat 4 se cuenta con registros entre los años 1988 y 1993, aunque no de forma continua. La Figura 28 presenta una de las imágenes más antiguas del programa Landsat 5 que se obtuvo de la zona de estudio, año 1996.

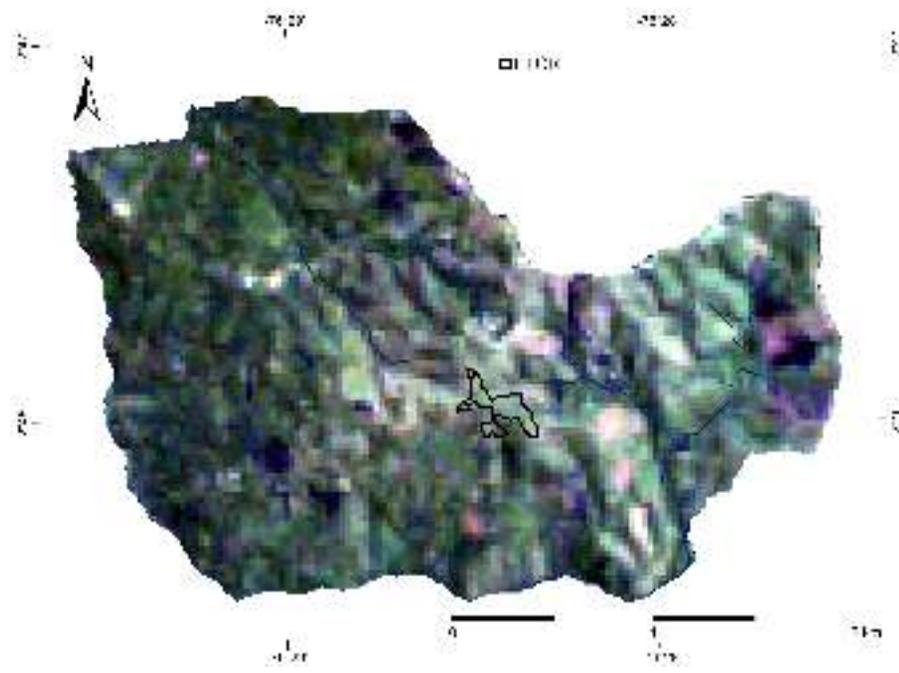


Figura 28: Imagen satelital representativa de la misión Landsat 5 del año 1996.

# Referencias

- CMGRD. (2014). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres* (Inf. Téc.). Caldono. de Administración Pública, E. S., y cols. (2017). Plan municipal para la gestión del riesgo de desastres-pmgrd municipio de caldono cauca.
- ESA. (2020). *Sentinel missions*. Descargado de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions>
- GoogleEarthEngine. (2020a). *Landsat collection*. Descargado de <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat>
- GoogleEarthEngine. (2020b). *Sentinel collection*. Descargado de <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentinel>
- INGEOMINAS. (2003). Geología de la Plancha 343 Silvia. , 106.
- NASA. (2020). *Landsat science*. Descargado de <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- NOAA. (2020). *Multivariate enso index version 2 (mei.v2)*. Descargado de <https://psl.noaa.gov/enso/mei/>
- Poveda, G., y Mesa, Ó. J. (2015). Las fases extremas del fenómeno enso (el niño y la niña) y su influencia sobre la hidrología de colombia. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(1), 21–37.
- SGC. (2014). Memoria Explicativa Del Mapa Geomorfológico Memoria Explicativa Del Mapa Geomorfológico. (009), 1–132.
- SGC y UIS. (2014). *Susceptibilidad Y La Amenaza Relativa Por Plancha 343 – Silvia Susceptibilidad Y La Amenaza Relativa Por* (Inf. Téc. n.º 009). SGC.

Parte I

**Viabilidad Jurídica**

## Capítulo 2

# Viabilidad Jurídica

### Introducción

El capítulo tiene como propósito analizar el sustento normativo que permita viabilizar la futura Fase III (Construcción) del proyecto de vivienda en el antiguo ETCR- localizado en el municipio de Caldoño, para que aquellas personas que hicieron dejación de las armas puedan acceder a una vivienda en condiciones dignas, producto de un ejercicio de planificación del territorio rural, de modo que se constituya en uno de los elementos que contribuyan a la consolidación de estos espacios como territorios de paz.

Recogiendo lo anterior, el presente capítulo tendrá en cuenta en el análisis, no solo la zona donde se ubica el antiguo ETCR, sino los territorios aledaños al mismo, con el propósito de lograr su cohesión territorial en una zona determinada, donde puedan unirse esfuerzos y verse beneficiados de las políticas públicas derivadas de la firma del Acuerdo de Paz, direccionadas hacia el fortalecimiento comunitario, consolidando un territorio que les permita habitarlo dignamente y donde se les garantice en el tiempo un desarrollo socio ambiental y productivo, lo cual implica su articulación con los respectivos Planes de Ordenamiento Territorial (POT), y el consecuente licenciamiento urbanístico a ser autorizado por el municipio, como requisito esencial para adelantar acciones de urbanización o parcelación y construcción así como autorizaciones de subdivisión de inmuebles, lo cual es necesario para la individualización de derechos de propiedad a través de Escritura Pública o excepcionalmente a través de acto administrativo.

Finalmente, desde el componente normativo se establecerán los escenarios de viabilización del proyecto de vivienda para el antiguo ETCR indicando las rutas jurídicas y recomendaciones que se tendrían para su incorporación e implementación en las normas urbanísticas del municipio objeto de estudio, de

acuerdo al estado de vigencia de su Plan de Ordenamiento Territorial.

## 2.1. Antecedentes

En cumplimiento del mandato constitucional consagrado en el artículo 22 de la Constitución Política de Colombia que establece “La paz es un derecho y un deber de obligatorio cumplimiento”, el Gobierno de Colombia, suscribió con el grupo armado FARC-EP el acuerdo final para la terminación del conflicto en el cual se dejaron plasmados seis ejes temáticos que tienen que ver con i) Reforma rural integral, ii) Participación Política, III) Fin del conflicto, IV) Solución Integral al problema de las Drogas ilícitas y V) Acuerdo sobre las víctimas del conflicto VI) Mecanismos de implementación y verificación . El Acuerdo Final para la terminación del conflicto y la construcción de una paz estable y duradera, fue refrendado el 30 de noviembre de 2016 por el Congreso de la República.

En este caso, el eje temático que nos compete abordar es el de la reforma rural integral, con miras a establecer la viabilidad jurídica del desarrollo o construcción de los proyectos de vivienda en los Espacios Territoriales de Capacitación y Reincorporación - ETCR. Sin embargo, antes de adentrarnos en el estudio normativo o marco jurídico que permitirá establecer el sustento legal o viabilidad jurídica para la formalización de los proyectos de vivienda, es necesario, conocer como fue el proceso de surgimiento de estas zonas y el espíritu con el cual fueron creadas.

La Ley 1779 de 2016, modificatoria de la Ley 418 de 1997 en el parágrafo 3° del artículo 8 dispuso la creación de unas zonas rurales con carácter temporal para adelantar en ese momento las actividades propias del proceso de paz, como negociación y firma de acuerdos. Conforme a esta facultad se expedieron los decretos 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025 y 2026 de 2016, y 150 de 2017, por los cuales se establecieron las Zonas Veredales Transitorias de Normalización (ZVTN) y los Puntos Transitorios de Normalización (PTN), con el objetivo de *“garantizar el Cese al Fuego y de Hostilidades Bilateral y Definitivo y Dejación de Armas (CFHBD-DA)”* e *“iniciar el proceso de preparación para la reincorporación a la vida civil de las estructuras de las FARC-EP en lo económico, lo político y lo social de acuerdo con sus intereses”*, las cuales fueron prorrogadas en su duración por los Decretos números 901 de 29 de mayo de 2017 hasta el 29 de julio de 2017 y 1274 de 28 de julio de 2017

hasta el 15 de agosto de 2017.

Por su parte, el artículo 3° del Decreto número 1274 de 28 de julio de 2017 estableció que las Zonas Veredales Transitorias de Normalización - ZVTN y los Puntos Transitorios de Normalización - PTN, una vez terminados, se convertirían en los Espacios Territoriales de Capacitación y Reincorporación - ETCR.

Así las cosas, con el fin de crear un marco jurídico para la implementación y el funcionamiento de los - ETCR, se expidió el Decreto 2026 de 2017 con el fin de dar continuidad al proceso de reincorporación a la vida civil por parte de los ex miembros de las FARC-EP, determinando expresamente que estos espacios "son lugares para el desarrollo de actividades que faciliten la reincorporación a la vida civil en lo económico, lo social y lo productivo (...)"

La norma en mención, dispuso igualmente que la Agencia para la Reincorporación y Normalización (ARN) tiene la responsabilidad de administrar los bienes muebles e inmuebles necesarios para el funcionamiento de los antiguos Espacios Territoriales de Capacitación y Reincorporación de los ex miembros de las FARC-EP para su reincorporación a la vida civil y la implementación de proyectos productivos, así como los procesos de formación para la comunidad en general.

Con respecto a su duración este decreto en el artículo 5°, dispuso que los Espacios Territoriales de Capacitación y Reincorporación tendrían una duración de dos (2) años contados a partir de la fecha establecida en los artículos 1 y 2 del Decreto 1274 de 2017, permitiendo la posibilidad de modificarlos, suprimirlos o prorrogarlos según las necesidades del caso. Conforme a esto, su vigencia se extendió hasta el 15 de agosto de 2019.

De igual forma dispuso en el artículo 6° que la administración de estos espacios, estaría a cargo del Fondo de Programas Especiales para la Paz hasta el 31 de marzo de 2018 o una vez finalizada la transferencia de cada uno de los ETCR, señalando además que dentro de este término, dicho Fondo debía efectuar la transferencia de los bienes destinados para el funcionamiento de los Espacios Territoriales de Capacitación y Reincorporación a la Agencia para la Reincorporación y la Normalización (ARN).

Por su parte el párrafo 1° del artículo 6° señaló lo siguiente:

“La Agencia para la Reincorporación y la Normalización (ARN) adelantará las acciones correspondientes en el territorio con el fin de establecer las necesidades que permitan adelantar las actividades de reincorporación a la vida civil de los ex miembros de FARC-EP y gestionará en coordinación con la Agencia

Nacional del Territorio (ANT), en el marco de sus competencias, los trámites administrativos a que haya lugar para la adquisición de predios”.



Figura 29: Proceso de creación de los antiguos ETCR. Fuente Convenio 752 de 2020

## 2.2. Viabilización del antiguo ETCR Los Monos a la luz de la norma de ordenamiento territorial vigente

Se identifican 3 rutas o caminos para la implementación de los ETCR. A continuación se presentan y se acompañan cada una de ellas de los aspectos más relevantes que tendrán incidencia al momento de su puesta en marcha. Asimismo, se presenta un cronograma en el cual se especifica el paso a paso que va desde la apropiación presupuestal hasta la etapa final de solicitud de licencia del proyecto, su construcción y la entrega de las viviendas.

### 2.2.1. Viabilización por vía de revisión del POT

La vigencia de los contenidos de corto, mediano y largo plazo son definidos por el propio Plan de Ordenamiento Territorial en concordancia con lo establecido en el artículo 28 de la Ley 388 de 1997, modificado por el artículo segundo

de la Ley 902 de 2004, modificado a su vez por el artículo 120 del Decreto Ley 2106 de 2019 el cual establece:

Los planes de ordenamiento territorial deberán definir la vigencia de sus diferentes contenidos y las condiciones que ameritan su revisión, en concordancia con los siguientes parámetros:

1. El contenido estructural del plan tendrá una vigencia de largo plazo, que para este efecto se entenderá como el correspondiente a tres períodos constitucionales de las administraciones municipales y distritales.
2. Los contenidos de los componentes urbanos y rurales de mediano plazo tendrán una vigencia correspondiente al término de dos períodos constitucionales de las administraciones municipales.
3. Los contenidos urbanos y rurales de corto plazo y los programas de ejecución regirán durante un período constitucional completo de la administración municipal y distrital completo, habida cuenta de las excepciones que resulten lógicas en razón de la propia naturaleza de las actuaciones contempladas o de sus propios efectos.
4. Las revisiones estarán sometidas al mismo procedimiento previsto para su aprobación y deberán sustentarse en parámetros e indicadores de seguimiento relacionados con cambios significativos en las previsiones sobre población urbana; la dinámica de ajustes en usos o intensidad de los usos del suelo; la necesidad o conveniencia de ejecutar proyectos de impacto en materia de transporte masivo, infraestructuras, expansión de servicios públicos o proyectos de renovación urbana; la ejecución de macroproyectos de infraestructura regional o metropolitana que generen impactos sobre el ordenamiento del territorio municipal o distrital, así como en la evaluación de sus objetivos y metas del respectivo plan.

No obstante, si al finalizar el plazo de vigencia establecido no se ha adoptado un nuevo plan de ordenamiento territorial, seguirá vigente el ya adoptado.

5. Las autoridades municipales y distritales podrán revisar y ajustar los Planes de Ordenamiento Territorial o sus componentes una vez vencido el período constitucional inmediatamente anterior.

En las revisiones de los Planes de Ordenamiento se evaluará por los respectivos Alcaldes los avances o retrocesos, y se proyectarán nuevos programas para

el reordenamiento de los usos de servicios de alto impacto referidos a la prostitución y su incompatibilidad con usos residenciales y dotacionales educativos.

De igual manera, el Decreto Único Nacional del Sector Vivienda (Decreto 1077 de 2015) reglamenta el artículo 28 de la Ley 388 de 1997 en la subsección 3, artículo 2.2.2.1.2.3.3 estableciendo que los Concejos Municipales o Distritales, por iniciativa del alcalde podrán revisar y ajustar los contenidos de largo, mediano o corto plazo de los Planes de Ordenamiento Territorial, siempre y cuando haya vencido el término de vigencia de cada uno de ellos, según lo establecido en dichos planes; posibilitando que una vez estén vencidos los contenidos, el alcalde pueda impulsar la revisión y ajuste en el corto plazo de las normas urbanísticas complementarias; en el mediano plazo de las normas urbanísticas generales y en el largo plazo de las normas urbanísticas estructurales.

Resalta la norma en mención que las revisiones deben estar sustentadas en parámetros e indicadores de seguimiento relacionados con cambios significativos en la población urbana, la necesidad de realizar ajustes en usos o intensidad de los usos del suelo, la necesidad o conveniencia de ejecutar proyectos de impacto en materia de transporte masivo, infraestructuras, expansión de servicios o proyectos de renovación urbana; la ejecución de macroproyectos de infraestructura regional o metropolitana que generen impactos sobre el ordenamiento del territorio municipal o distrital, así como en los resultados de seguimiento y evaluación de los objetivos y metas del respectivo Plan.

Ahora bien, con relación a la vigencia de los POT, el artículo 2.2.2.1.2.2 del Decreto 1077 de 2015 señala que ésta se establecerá de acuerdo con lo señalado en el artículo 28 de la Ley 388 de 1997, modificado por el artículo 120 del Decreto Ley 2106 de 2019, o la norma que lo modifique, adicione o sustituya, anotando que el largo plazo del plan de ordenamiento territorial, corresponde a tres períodos constitucionales completos.

A continuación se presentan los actos administrativos mediante el cual se adoptó el PBOT del municipio de Caldonó con sus respectivas modificaciones o revisiones, a fin de establecer el estado de su vigencia de cara a emprender el tipo de revisión o ajuste.

### **Actos administrativos**

- Acuerdo 023 de Enero de 2006 ( Norma aplicada) Primer PBOT. Establece vigencia de 10 años.

Luego de la evaluación de la vigencia del PBOT del municipio de Caldonó,

se concluye que sus contenidos de corto, mediano y largo plazo han superado los plazos inicialmente estimados, aunque mientras se adopte un nuevo POT se considera que el cuerpo normativo se encuentra vigente y puede continuar aplicando norma urbanística con base en el Acuerdo Municipal 23 de 2006.

Por su parte, **la modificación excepcional de norma urbanística** se considera sólo aplicable cuando no han expirado los contenidos de largo plazo, máxime cuando este tipo de ajuste tiene prohibición expresa de ampliar vigencia del POT y se considera procedente solamente cuando se realiza para ajustar algunas normas urbanísticas según su jerarquía tal como lo regla el artículo 15 de la Ley 388 de 1997 en pro del cumplimiento de los objetivos y estrategias de largo y mediano plazo, según lo establece el Artículo 2.2.2.1.2.3.4 del Decreto 1077 de 2015.

Una tercera opción es la creación de un trámite extraordinario, con la finalidad de generar un marco normativo propio a los antiguos ETCR permitiendo su incorporación inmediata en el ordenamiento territorial municipal, con la finalidad de habilitar su licenciamiento urbanístico en los términos del Artículo 99 de la Ley 388 de 1997.

Seguidamente se desarrollarán las 3 alternativas posibles de incorporación de los antiguos ETCR al ordenamiento territorial y los requisitos normativos que lo habilitarían.

### **2.2.1.1. Revisión Ordinaria del POT**

La revisión, ajuste y vigencia de los contenidos de corto, mediano y largo plazo del POT están contemplados en la Ley 388 de 1997, y en armonía con el plazo máximo de 12 años establecido en la Ley 1551 de 2012; la primera reglamentada a su vez por el Decreto Único Nacional 1077 de 2015 modificada parcialmente por el Decreto 1232 de 2020 <sup>1</sup> en lo referente al proceso de revisión y ajuste de los POT. De acuerdo con estas normas se podrán revisar y ajustar por iniciativa del alcalde los contenidos de largo, mediano o corto plazo de los Planes de Ordenamiento Territorial, siempre y cuando haya vencido el término de vigencia de cada uno de ellos, según lo establecido en dichos planes, posibilitando que en el corto plazo sean revisadas las normas urbanísticas complementarias, en el mediano plazo las normas urbanísticas generales y en el largo plazo las normas urbanísticas estructurales, con sus contenidos,

---

<sup>1</sup>En adelante se entenderán incorporadas las normas del Decreto 1232 de 2020 en el Decreto 1077 de 2015 por el efecto jurídico que así lo dispuso.

así: La Ley 388 de 1997 concibe las Normas Urbanísticas de la siguiente manera:

**Normas urbanísticas estructurales.** Son las que aseguran la consecución de los objetivos y estrategias adoptadas en el componente general del plan y en las políticas y estrategias de mediano plazo del componente urbano.

Estas normas incluyen diferentes aspectos, que puedan vincularse o relacionarse con los alcances de un centro poblado:

- Clasificación y delimitación de los suelos
- Las que definan las características de las unidades de actuación o las que establecen criterios y procedimientos para su caracterización, delimitación e incorporación posterior, incluidas las que adoptan procedimientos e instrumentos de gestión para orientar, promover y regular las actuaciones urbanísticas vinculadas a su desarrollo.

**Normas urbanísticas generales.** Son aquellas que permiten establecer usos e intensidad de usos del suelo, así como actuaciones, tratamientos y procedimientos de parcelación, urbanización, construcción e incorporación al desarrollo de las diferentes zonas comprendidas dentro del perímetro urbano y suelo de expansión. Por consiguiente, otorgan derechos e imponen obligaciones urbanísticas a los propietarios de terrenos y a sus constructores, conjuntamente con la especificación de los instrumentos que se emplearán para que contribuyan eficazmente a los objetivos del desarrollo urbano y a sufragar los costos que implica tal definición de derechos y obligaciones.

En consecuencia, además de las regulaciones que por su propia naturaleza quedan contenidas en esta definición, hacen parte de las normas urbanísticas, entre otras:

- Las especificaciones de aislamientos, volumetrías y alturas para los procesos de edificación.
- La adopción de programas, proyectos y macroproyectos urbanos no considerados en el componente general del plan.
- Las características de la red vial secundaria, la localización y la correspondiente afectación de terrenos para equipamientos colectivos de interés público o social a escala zonal o local, lo mismo que la delimitación de espacios libres y zonas verdes de dicha escala.

- Las especificaciones de las redes secundarias de abastecimiento de los servicios públicos domiciliarios.
- Las especificaciones de las cesiones urbanísticas gratuitas, así como los parámetros y directrices para que sus propietarios compensen en dinero o en terrenos, si fuere del caso.
- Las demás previstas en la Ley o que se consideren convenientes por las autoridades municipales.

**Normas complementarias.** Se trata de aquellas relacionadas con las actuaciones, programas y proyectos adoptados en desarrollo de las previsiones contempladas en los componentes general y urbano del plan de ordenamiento, y que deben incorporarse al Programa de ejecución que trata el artículo 18 de la Ley 388 de 1997. También forman parte de este nivel normativo, las decisiones sobre las acciones y actuaciones que por su propia naturaleza requieren ser ejecutadas en el corto plazo y todas las regulaciones que se expidan para operaciones urbanas específicas y casos excepcionales, de acuerdo con los parámetros, procedimientos y autorizaciones emanadas de las normas urbanísticas generales.

Entre otras, pertenecen a esta categoría:

- La declaración e identificación de los terrenos e inmuebles de desarrollo o construcción prioritaria.
- La localización de terrenos cuyo uso es el de vivienda de interés social y la reubicación de asentamientos humanos localizados en zonas de alto riesgo.
- Las normas urbanísticas específicas que se expidan en desarrollo de planes parciales para unidades de actuación urbanística y para otras operaciones como macroproyectos urbanos integrales y actuaciones en áreas con tratamientos de renovación urbana o mejoramiento integral.

Las normas para la urbanización y construcción de vivienda no podrán limitar el desarrollo de programas de vivienda de interés social, de tal manera que las especificaciones entre otros de loteos, cesiones y áreas construidas deberán estar acordes con las condiciones de precio de este tipo de vivienda.

Para aprobar y adoptar las revisiones de los POT se surtirán los mismos trámites de concertación, consulta y aprobación previstas en los artículos 24 y 25 de la Ley 388 de 1997.

También podrá ser adoptado mediante Decreto por el Alcalde municipal en caso que el Concejo Municipal no lo adopte dentro del plazo de 90 días definido para esto.

La modificación introducida al Decreto 1077 de 2015 mediante Decreto 1232 de 2020 estableció los contenidos y elementos mínimos sustanciales de los POT para llevar a cabo los procedimientos de revisión, adopción o modificación de este instrumento, señalando en el artículo 2.2.2.1.2.2.1 los documentos que lo deben conformar así:

0. Documento de seguimiento y evaluación.
1. Diagnóstico y su cartografía.
2. Documento técnico de soporte (DTS) que contiene (i) los componentes general, urbano y rural, (ii) los programas y proyectos, (iii) los Instrumentos de gestión y financiación, (iv) el programa de ejecución y la (v) la cartografía.
3. Proyecto de Acuerdo: Es la propuesta de acto administrativo mediante el cual se adoptará el Plan de Ordenamiento Territorial - POT, su estructura coincidirá con la del Documento Técnico de Soporte y lo aprobará en toda su extensión incluida su cartografía.
4. . Documento resumen: Es el documento con la explicación didáctica de los problemas existentes y las propuestas para resolverlos que corresponden a las decisiones adoptadas en el Acuerdo. Debe incluir una breve descripción de la realización de las instancias de consulta y concertación, así como de la participación ciudadana. Se emplea como medio de divulgación y socialización. (Artículos 2.2.2.1.2.2.1 y 2.2.2.1.2.3.1 del Decreto 1077 de 2015).

Esta ruta conlleva la evaluación de los componentes (General, Urbano y Rural) de los diferentes POT; el alcance de la revisión dependerá de la vigencia del instrumento según lo establecido en el artículo 28 de la Ley 388 de 1987, modificado por el Decreto Ley 2106 de 2019 y su relación con el período constitucional de alcaldes lo cual define el tipo de normas urbanísticas objeto de revisión según la jerarquía establecida en el Art 15 de la Ley 388 de 1997 a iniciativa del alcalde municipal, así:

- Corto Plazo: Normas complementarias.
- Mediano Plazo: Normas Urbanísticas Generales.
- Largo Plazo: Normas Urbanísticas Estructurales.

Finalmente se interpreta que la disposición consignada en el Artículo 6, numeral 9 de la Ley 1551 de 2011 corresponde a la vigencia máxima de los contenidos de largo plazo del PBOT los cuales se consideran fijos de 12 años o 3 períodos completos constitucionales de los alcaldes.

A continuación, se presenta un posible cronograma de ejecución del proyecto habitacional en un escenario de revisión ordinaria del PBOT como punto de partida y culminando con la entrega de viviendas de interés social rural. (Figura 30)



En este escenario de revisión ordinaria del PBOT se recomienda tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Su incorporación al PBOT haría que el antiguo ETCR quede armonizado normativamente con el resto del territorio municipal, surtiendo las etapas de divulgación, participación y concertación con los actores institucionales y la comunidad en general
- Se hace necesario ante la urgencia de implementar en el menor tiempo posible la norma urbanística para la debida ejecución del proyecto habitacional del antiguo ETCR de un apoyo institucional en asistencia técnica, económica y estudios de soporte para el proceso de revisión y ajuste del POT, al considerarse la falta de recursos económicos y funcionarios con conocimiento en Ordenamiento Territorial como el principal problema a resolver para garantizar POT actualizados.
- El Concejo Municipal puede efectuar cambios al proyecto de Acuerdo que se presente, excepto en aquellos asuntos de concertación ambiental, a menos que sea para establecer disposiciones más restrictivas.
- El costo del proceso de revisión ordinaria es mayor que el de modificación excepcional de norma urbanística porque implica la revisión y ajuste de todos los componentes del PBOT.

#### **2.2.1.2. Modificación excepcional de norma urbanística**

Este procedimiento de modificación excepcional de normas urbanísticas de los Planes de Ordenamiento Territorial deberán acoger en los apartes que correspondan lo dispuesto en la Ley 388 de 1997, y el Decreto 1077 del 2015 “Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio” Esta modificación podrá emprenderse en cualquier momento a iniciativa del Alcalde municipal, demostrando con estudios técnicos los motivos que llevan a dicha modificación. Su aplicación requiere de la existencia de norma en concreto que lo habilite.

La modificación excepcional de alguna o algunas de las normas urbanísticas de carácter estructural o general del Plan de Ordenamiento Territorial, tienen por objeto asegurar la consecución de los objetivos y estrategias territoriales de largo y mediano plazo definidas en los componentes General, Urbano y Rural del Plan de Ordenamiento Territorial.

Adicionalmente las modificaciones excepcionales de norma urbanística no podrán ampliar los términos de vigencia de los planes de ordenamiento territorial ni las de sus componentes o contenidos y tampoco podrán modificar los objetivos y estrategias de largo y mediano plazo definidas en los componentes General, Urbano y Rural del Plan de Ordenamiento Territorial.

A continuación, se presenta un posible cronograma de ejecución del proyecto habitacional en un escenario de modificación excepcional de norma urbanística del PBOT como punto de partida y culminando con la entrega de viviendas de interés social rural. Figura 31



En este escenario de modificación excepcional de normas urbanísticas del PBOT se recomienda tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Su incorporación al PBOT haría que el antiguo ETCR quede armonizado normativamente con el resto del territorio municipal, surtiendo todas las etapas de divulgación, participación y concertación con los actores institucionales y la comunidad en general.
- El proceso de modificación excepcional puede agilizarse en la medida en que las entidades participen, concierten y aprueben el proyecto de PBOT en un corto tiempo sin hacer uso de los términos máximos permitidos por la Ley 388 de 1997.
- El Concejo Municipal puede efectuar cambios al proyecto de Acuerdo que se presente, excepto en aquellos asuntos de concertación ambiental, a menos que sea para volver las normas en esta materia más restrictivas.
- El municipio puede focalizarse exclusivamente en las normas urbanísticas que requieran ser ajustadas para dar viabilidad legal y urbanística del antiguo ETCR.
- El costo del proceso de modificación excepcional es menor que el de un proceso de revisión ordinaria porque implica solo la revisión de los contenidos que la motivan.
- Finalmente, con el ánimo de generar un camino más expedito, ajustado a la necesidad de habilitar el proyecto de vivienda en el corto plazo y amparados en el marco normativo ordinario, se recomienda generar un artículo adicional en el Decreto 1077 de 2015 que habilite la modificación excepcional de Norma Urbanística así haya operado el vencimiento de los contenidos de largo plazo del POT, cuando involucre una modificación de las clases y categorías del suelo en cumplimiento del proceso de paz con las extintas FARC-EP, incluso que se posibilite el ajuste a los objetivos y estrategias de largo plazo en el evento de ser necesario, así mismo ampliar la vigencia del POT, por cuanto el mismo Artículo 2.2.2.1.2.3.4, lo limita, allanando el camino desde el punto de vista legal.
- ● Así mismo, no puede homologarse la vigencia de la norma urbanística con las vigencias de los contenidos del Plan de Ordenamiento Territorial, pues la Ley 388 de 1997 parte del supuesto ideario que al vencerse un contenido

se entiende que sus objetivos y estrategias (como normas mayores y sobre las que se soportan las demás normas urbanísticas) también vencieron, considerándose postulados que habilitan los diferentes tipos de revisión. En el evento que durante el proceso de revisión y ajuste se considere que producto de la evaluación del POT los objetivos y estrategias de largo y mediano plazo son pertinentes, el Municipio podría retomarlos y generarles una nueva vigencia de largo o mediano plazo, pero esto solo puede ser realizado por una revisión ordinaria de largo plazo, a no ser que sea creada una norma en concreto que lo habilite, la cual gozaría de total presunción de legalidad.

### 2.2.1.3. Posturas jurídicas frente a la revisión del POT

Se presentan los argumentos que se han dado en materia de revisión de POT cuando la vigencia de éste se encuentra expirada en sus contenidos de largo plazo, donde las diferentes interpretaciones van desde **afirmar que vencidos los contenidos del componente General del Plan no se puede adoptar uno nuevo mediante una revisión excepcional de norma urbanística** y otra postura, como la del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio que sostiene que **es posible efectuar una revisión de la norma urbanística así la vigencia de 12 años de los contenidos de largo plazo se encuentre expirada.**

Con el fin de ilustrar el tema y mostrar las diferentes miradas existentes al respecto, se citan los siguientes conceptos:

- **Concepto de la Procuraduría General de la Nación** que, con motivo del proceso de revisión y ajuste de los Planes de Ordenamiento Territorial, dirigió en el año 2013 a los Alcaldes Municipales y Distritales, Concejos Municipales y Distritales, Personeros Municipales y Consejos Territoriales de Planeación, en el cual expresamente señaló:

**“3. Sobre el alcance de las revisiones y modificaciones a los POT.** Todo proceso de revisión de los contenidos de corto y mediano plazo y de modificación excepcional de las normas urbanísticas del POT debe respetar la prevalencia de jerarquía de los contenidos de largo plazo, las normas urbanísticas estructurales que concretan el modelo de ordenamiento y “la estructura urbano-rural e intraurbana que se busca alcanzar a largo plazo, los cuales

deberán regir, al menos, durante tres (3) periodos constitucionales de los alcaldes municipales o distritales.

Solo en la revisión del plan por vencimiento de la vigencia de largo plazo, se podrá realizar un replanteamiento del contenido estratégico”. (Procuraduría General de la Nación, 2013)

Luego, al referirse a la modificación excepcional de norma urbanística puntualizó:

**4.3 Modificación excepcional de normas urbanísticas.** De acuerdo con el artículo 15 de la Ley 388 de 1997, la modificación excepcional de alguna o algunas de las normas urbanísticas de carácter estructural o general del POT, que tengan por objetivo asegurar la consecución de los objetivos y estrategias territoriales de la largo y mediano plazo definidas en los componentes general y urbano del POT, puede emprenderse en cualquier momento, a iniciativa del alcalde municipal o distrital, siempre y cuando se demuestren y soporten técnicamente los motivos que dan lugar a su modificación, pero solamente mediante la revisión general del POT se podrá modificar el modelo territorial vigente.

El marco normativo establece que solo es posible realizar la revisión de los objetivos y estrategias del POT al vencimiento de la vigencia de largo plazo. Así mismo, el artículo 12 de la Ley 810 de 2003, hace referencia únicamente a “revisar y hacer ajustes” a los planes de ordenamiento ya adoptados y vigentes, **por lo que no es posible a través del procedimiento de modificación excepcional adoptar uno nuevo.”** ...

- **Concepto de la Sala de Consulta y Servicio Civil del Consejo de Estado.** (Consejo de Estado, 2013) con ocasión de la consulta que le formuló el Ministro del Interior de la época con relación a la vigencia del Plan de Ordenamiento Territorial – POT de Bogotá D.C.; al procedimiento de modificación excepcional de las normas urbanísticas y a las competencias para adoptar y modificar el POT, permite inferir en su respuesta que una vez expirada la vigencia del POT se debe emprender una revisión ordinaria del mismo, descartando la posibilidad de hacer la revisión a través del procedimiento de una modificación excepcional de las normas urbanísticas. La Sala consultada, luego de establecer la fecha de vigencia del POT de

Bogotá, lo cual tuvo que hacer debido a que el Decreto Distrital 619 de 2000, revisado por el Decreto 469 de 2003, en el artículo 118, había modificado la vigencia del contenido general del POT, señalando que su vigencia sería igual “a la del tiempo que falta para terminar la actual administración del Distrito Capital y cuatro períodos constitucionales de gobierno de las próximas administraciones”. Y en tal sentido puntualizó lo siguiente:

“La actual administración” a que se refería la norma era la del Alcalde Antanas Mockus Sivickas, quien expidió el Decreto de revisión, cuyo período terminaba el 31 de diciembre de 2003. Los cuatro períodos constitucionales de gobierno de las próximas administraciones distritales se refieren a las administraciones de los Alcaldes Luis Eduardo Garzón (2004-2007), Samuel Moreno Rojas (2008-2011, con el encargo de la Dra. Clara López Obregón de junio a diciembre de 2011), Gustavo Petro Urrego (2012-2015) y el siguiente de 2016 a 2019. En consecuencia, el componente general del POT de Bogotá D.C. quedó con vigencia hasta el 31 de diciembre de 2019.”

Sin embargo, la Sala objeto de consulta, a la luz del artículo 6º de la Ley 1551 de 2012 “Por la cual se dictan normas para modernizar la organización y el funcionamiento de los municipios” precisó que la vigencia del POT de Bogotá D.C., fue reducida por virtud de esta norma, de cuatro (4) a tres (3) periodos constitucionales de la administración distrital, rigiendo por lo tanto hasta el 31 de diciembre de 2015. Esta posición la adopta amparada en el argumento de ser dicho mandato de orden legal y posterior, prevaleciendo sobre lo dispuesto por el artículo 118 del Decreto distrital 469 de 2003.

Con esta claridad, la Sala resuelve de fondo el interrogante acerca de si la actual administración distrital ha debido presentar un proyecto de revisión total del POT y no una modificación excepcional, a lo cual se responde que dicha administración, de acuerdo con la norma antes transcrita, no está obligada en la actualidad a presentar un proyecto de revisión total del POT, pero sí estará obligada dentro de los seis (6) meses anteriores al 31 de diciembre de 2015, fecha de vencimiento de la vigencia del POT de Bogotá D.C., a iniciar el trámite para la formulación del nuevo plan o su revisión o ajuste”

El Decreto 1077 de 2015 establece la vigencia de largo plazo del plan de ordenamiento territorial en tres periodos constitucionales completos, lo cual refuerza la tesis menos flexible que señala que al estar cumplida la tempo-

ralidad definida en el componente General del POT, vale decir, lo relativo a sus objetivos, estrategias y contenidos estructurales de largo plazo, se hace necesario emprender una revisión general de la norma territorial municipal. Para quienes sostienen esta tesis, esto se encuentra lógico y coherente, en la medida en que en ese estado de la norma es menester que se defina y actualice para los entes municipales un nuevo modelo de ocupación territorial acorde a las cambiantes dinámicas de los territorios, independientemente que se hayan o no cumplido estos contenidos de largo plazo.

- **Concepto del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.** Sin embargo, El Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, mediante concepto 2015ER0005670, con ocasión de la consulta que le formulara la Secretaría de Planeación del Distrito de Cartagena, respecto a la posibilidad de continuar adelantando un proceso de modificación excepcional de norma urbanística ya iniciado, no obstante encontrarse agotada la vigencia de largo plazo del POT, deja abierta la posibilidad de efectuar una modificación excepcional de norma urbanística, así todos los contenidos del Plan de Ordenamiento se encuentren vencidos, argumentando que mientras no se efectúe una revisión general del mismo, éste continúa vigente y además porque las normas no han establecido un límite de tiempo para iniciar este proceso.

El Ministerio en este concepto expresó lo siguiente:

**“¿Puede seguir adelantándose el proceso de modificación del Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito de Cartagena de Indias o, en su defecto se debe adelantar el proceso de revisión del Plan de Ordenamiento Territorial de Cartagena de Indias?”**

El trámite del proyecto de Modificación Excepcional de Norma Urbanística puede seguirse siempre y cuando el mismo cumpla con las condiciones normativas dispuestas para estos casos, así como con las reglas de procedimiento, siendo necesario que en este caso en particular finalizar el proceso de concertación con la autoridad ambiental, para lo cual se requiere el pronunciamiento del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, del cual dependerá las acciones a seguir respecto a este proyecto y por lo tanto, determinar si se debe continuar con el trámite ante las siguientes instancias de concertación, consulta y aprobación.

En consecuencia, siempre y cuando el proyecto de modificación excepcional

del Distrito de Cartagena cumpla con las condiciones técnicas y procedimentales establecidas en las normas que regulan este tipo de procesos, será posible adoptar dicha modificación sin perjuicio de que se realice la revisión general del POT.

***“¿Puede seguir adelantándose el proceso de modificación excepcional del Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito de Cartagena de Indias concomitante con el proceso de revisión del Plan de Ordenamiento Territorial de Cartagena de Indias?”***

***“¿Qué término tiene la administración para iniciar el proceso de revisión del Plan de Ordenamiento Territorial de Cartagena de Indias?”***

Como ya se señaló anteriormente la modificación excepcional de norma urbanística permite el ajuste de normas específicas establecidas en los POT, así mismo, las normas que regulan el ordenamiento del territorio disponen que al finalizar el plazo de vigencia de todos los contenidos del Plan de Ordenamiento, se debe proceder a adoptar la revisión general del mismo, señalando que mientras se adelanta este proceso continúa vigente el POT adoptado y teniendo presente que la modificación excepcional en ningún caso reemplaza la revisión general de un POT.

De acuerdo con la información remitida respecto a las vigencias del POT del Distrito de Cartagena, se observa que la vigencia del mismo se encuentra vencida, y por lo tanto existe la obligación de adelantar la revisión general del Plan durante este periodo de conformidad con lo dispuesto en las Leyes 388 de 1997 y 1551 de 2012, sin embargo no se ha establecido un límite de tiempo para este proceso. En esa medida el Alcalde Distrital, como máximo orientador de la planeación en la respectiva entidad territorial, será responsable de determinar la pertinencia y oportunidad para iniciar el proceso de revisión del POT, y por ende de coordinar la formulación oportuna del proyecto del plan, de someterlo a consideración del Consejo de Gobierno, y velar porque se surtan todas las fases para su aprobación.”

### **2.2.2. Viabilización por vía de la creación de trámite extraordinario de aprobación de normas urbanísticas**

*El Congreso de la Republica expidió la Ley 2079 del 14 de Enero del 2021 por medio de la cual se dictan disposiciones en materia de vivienda y hábitat señalando en el artículo 33, lo siguiente:*

”PROYECTOS DE VIVIENDA Y USOS COMPLEMENTARIOS EN EL PROCESO DE REINCORPORACIÓN Y NORMALIZACIÓN. El Gobierno Nacional determinará los proyectos y acciones necesarias que permitan resolver en suelo rural las necesidades de vivienda, servicios públicos, espacio público, equipamiento y vías que se requieran para la consolidación, transformación o reubicación de los antiguos Espacios Territoriales de Capacitación y Reincorporación (ETCR), los cuales podrán ser ejecutados de manera directa o indirecta a través de cualquier modalidad contractual.

Del mismo modo, el Gobierno Nacional impulsará proyectos individuales o colectivos de vivienda y usos complementarios para las personas reincorporadas que permanezcan activas dentro de la ruta de reincorporación de la Agencia para la Reincorporación y la Normalización (ARN), ubicadas en todo el territorio nacional.

PARÁGRAFO 1. En la determinación de los proyectos y acciones se podrán considerar los que permitan resolver las necesidades de las comunidades alejadas,

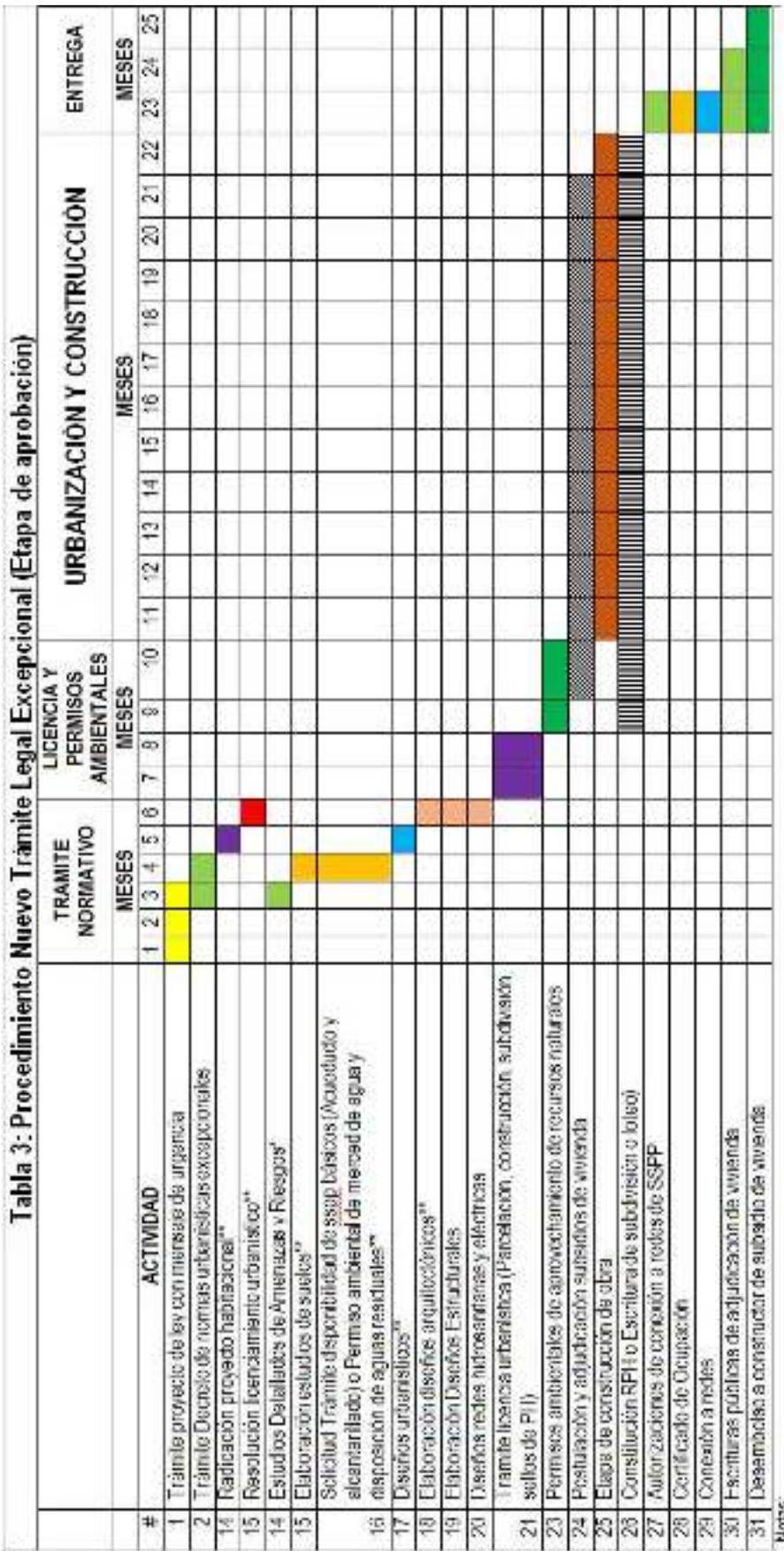
PARÁGRAFO 2. Los Planes de Ordenamiento Territorial de los municipios en donde se localicen los antiguos Espacios territoriales de capacitación y reincorporación, en ningún caso serán oponibles a la ejecución de los proyectos antes mencionados. El Gobierno Nacional informará a los municipios la decisión sobre la ejecución de estos proyectos, y deberá entregarles la información pertinente, la cual incluirá las normas urbanísticas básicas para la consolidación de los antiguos ETCR, con el fin que sea tenida en cuenta en el proceso de revisión y ajuste de los Planes de Ordenamiento Territorial de los municipios.”

De acuerdo al contenido de esta Ley, el Gobierno Nacional deberá establecer los mecanismos jurídicos a través de los cuales los municipios podrán incorporar en su respectivos Planes de Ordenamiento Territorial, las normas urbanísticas que permitan la expedición de licencias necesarias para desarrollar el proyecto de vivienda en los antiguos ETCR.

A continuación, se presenta un posible cronograma de ejecución del proyecto habitacional como punto de partida y culminando con la entrega de viviendas

de interés social rural.(Figura 32)

**Tabla 3: Procedimiento Nuevo Trámite Legal Excepcional (Etapa de aprobación)**



\* Los estudios detallados corresponden a los establecidos en la Resolución 462 del MVCT en su artículo 3. Numeral 4 en el evento de pretenderse parcelar porciones de terreno catalogadas como áreas con condición de amenaza o riesgo en el POT

\*\* Los tiempos establecidos en este cronograma son sugeridos, corresponden a tiempos aproximados, combats a partir de la entrega de los estudios y documentos técnicos como insumos para el trámite de aprobación de licencias urbanísticas de parcelación y construcción, su duración podrá ajustarse según las condiciones, tamaño del planeamiento urbanístico y disposiciones normativas vigentes al momento de la radicación de la solicitud de licenciamiento

Figura 32: Cronograma aproximado para un escenario Ley

## 2.3. Caracterización y análisis general de la norma territorial del municipio de Caldon

Para este estudio se toma como unidad de análisis **EL PREDIO** entendido éste como el área de interés para el desarrollo del proyecto de vivienda por parte del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, en el cual se pretende materializar las soluciones habitacionales en cumplimiento de lo definido en el Acuerdo de Paz.

Este análisis en consecuencia abordará una **caracterización general en cuanto a lo espacial y tenencia del predio** a partir de la información primaria y secundaria recolectada a lo largo del proceso. Finalmente se evaluarán las posibilidades del predio a la luz de la norma vigente a nivel municipal y demás normas que le sean aplicables, generando recomendaciones de cara a la viabilización del proyecto de vivienda.

Así mismo, desde el punto de vista jurídico se presenta el estudio de tenencia del predio donde se encuentra el antiguo ETCR Los Monos, cuyo análisis se hace a partir de la revisión de los títulos de adquisición como también del folio de matrícula inmobiliaria o certificado de tradición, a fin de establecer información relevante acerca del estado jurídico del inmueble con relación a su identificación física, la naturaleza pública o privada, la cadena de tradición hasta el o los propietarios actuales. Igualmente el examen advierte sobre la existencia o no de gravámenes que puedan afectar o limitar la propiedad y por último se concluye sobre la viabilidad jurídica del predio, es decir, si se encuentra saneado o requiere algún tipo de actuación o trámite de cara a su futura negociación.

### 2.3.1. Análisis de tenencia antiguo ETCR Los Monos

En la siguiente tabla se presenta el estudio de títulos realizado al certificado de tradición del predio Los Monos.

Tabla 2: Análisis de la propiedad al inmueble Los Monos.

<b>Análisis de la propiedad</b>
---------------------------------

Continuación de la tabla 2



**Figura: Los Monos (Municipio de Caldoño) Predio Los Monos (Levantamiento topográfico)**

Fuente: Levantamiento informativo topográfico de febrero 23 de 2020.  
 Gerencia de Transformación de Espacios Territoriales  
 Cartografía Básica Digital Integrada. República de Colombia.  
 Escala 1:25.000. IGAC

Departamento:	Cauca
Municipio	Caldoño
Vereda	Santa Rosa y Gualo
Nombre del Predio	Los Monos
Tipo de Predio	Rural
Código Catastral	No registra
Área según catastro	4 Ha + 4625 m <sup>2</sup>
Área según título	NA
Folio Matricula Inmobiliaria	NA
Fecha de Apertura del folio	NA

Continuación de la tabla 2	
Documento y/o acto jurídico por el cual se da apertura el FMI	NA
Estado del folio	NA
Folio Matriz	NA
Folios segregados	NA
Nombre Propietario(s)	antiguo ETCR Caldoneo 100 %
Naturaleza Jurídica	Comunidad étnica indígena
<b>Concepto:</b> Este predio fue adquirido por el antiguo ETCR de Caldoneo por acta de adjudicación del 20 de enero de 2020 por parte del Cabildo Indígena de San Lorenzo de Caldoneo y la Junta de Acción Comunal de la vereda Santa Rosa.	
<b>Observaciones técnicas:</b> El área del antiguo ETCR corresponde al levantamiento topográfico entregado por el Ministerio. No coincide con ningún predio catastral ya que se traslapa parcialmente sobre el área de siete predios catastrales que pueden ser propiedad privada. Se debe identificar si se encuentra dentro del área del predio que por escritura pública 335 del 1986-12-30 Notaria de Silvia, propiedad del Fondo de Desarrollo Comunal del Ministerio de Gobierno para el Resguardo Indígena de Caldoneo, con un área de 53 hectáreas y asociado a la referencia catastral 191370001000000010428000000000, aunque dicha área no coincide con la de dibujo.	

### 2.3.2. Consulta previa

El predio Los Monos se encuentra ubicado en territorio del Resguardo Indígena San Lorenzo por lo que se hace necesario determinar la obligatoriedad de adelantar el proceso de consulta previa en el antiguo ETCR Los Monos.

La Constitución Política de Colombia define en el artículo 1º que Colombia es un estado democrático, participativo y pluralista, que reconoce y protege la diversidad étnica y cultural de la Nación (C.P Art 7) lo cual conlleva a que las comunidades étnicas gocen de las garantías y derechos fundamentales.

Con relación a la consulta previa, la Corte Constitucional ha señalado que ésta se constituye en derecho fundamental de rango constitucional e irrenunciable de los pueblos indígenas y tribales que consiste en el deber que le asiste al

Estado de consultar de manera previa a las comunidades étnicas todas aquellas medidas de orden legislativo o administrativo que conlleven una afectación directa y específica. Así las cosas, en aquellos casos en que procede la consulta previa surge para las comunidades un derecho fundamental susceptible de protección por la vía de la Acción de Tutela. (Sentencia T-499 de 2018).

Igualmente cabe señalar que Colombia ratificó mediante la Ley 21 de 1991, El Convenio 169 de 1989, sobre los pueblos indígenas y tribales en países independientes, respecto del cual la Corte ha dicho que hace parte del bloque de constitucionalidad, constituyéndose en la herramienta y fundamento de la consulta previa al señalar lo siguiente:

1. El derecho de los pueblos indígenas a mantener y fortalecer sus culturas, formas de vida e instituciones propias.
2. El derecho a participar de manera efectiva en las decisiones que les afectan.

En este sentido, en el artículo 6° prescribe: Al aplicar las disposiciones del presente Convenio, los gobiernos deberán:

- Consultar a los pueblos interesados, mediante procedimiento apropiados y en particular a través de sus instituciones representativas, cada vez que se prevean medidas legislativas o administrativas susceptibles de afectarles directamente.
- Establecer los medios a través de los cuales los pueblos interesados puedan participar libremente, por lo menos en la misma medida que otros sectores de la población, y a todos los niveles en la adopción de decisiones en instituciones electivas y organismos administrativos y de otra índole responsables de políticas y programas que les conciernan.
- Establecer los medios para el pleno desarrollo de las instituciones e iniciativas de esos pueblos y en los casos apropiados proporcionar los recursos necesarios para este fin..

2. Las consultas llevadas a cabo en aplicación de este Convenio deberán efectuarse de buena fe y de una manera apropiada a las circunstancias, con la finalidad de llegar a un acuerdo o lograr el consentimiento acerca de las medidas propuestas Y en este mismo sentido el numeral 1° del artículo 7 señala:

1. Los pueblos interesados deberán tener el derecho de decidir sus propias prioridades en lo que atañe al proceso de desarrollo, en la medida en que

éste afecte a sus vidas, creencias, instituciones y bienestar espiritual y a las tierras que ocupan o utilizan de alguna manera, y de controlar, en la medida de lo posible, su propio desarrollo económico, social y cultural. Además, dichos pueblos deberán participar en la formulación, aplicación y evaluación de los planes y programas de desarrollo nacional y regional susceptibles de afectarles directamente.

Ahora bien, frente al caso específico de incorporación del antiguo ETCR Los Monos del municipio del Cauca, en la respectiva norma territorial (PBOT) no cabe duda que esto conllevará a una modificación de la norma urbanística existente lo cual cambiara las condiciones del territorio colectivo al generar cambios en las clases y categorías del suelo, aprovechamientos urbanísticos, usos del suelo, etc; lo cual aunque se considera mejora de las condiciones de habitabilidad de la población allí asentada, requiere de su participación a través de mecanismo de consulta previa; dicha consulta debe realizarse en la fase de concertación del proyecto de PBOT, según lo establecido por el artículo 24, numeral 4 de la Ley 388 de 1997 y el Decreto Único 1066 de 2015.

Así las cosas, la implantación de un centro poblado donde se construirá el proyecto de vivienda que albergará a los habitantes del antiguo ETCR Los Monos, es una medida administrativa que obliga a agotar el procedimiento de consulta previa, por las siguientes razones: **I)** La existencia de una comunidad indígena en la zona objeto de la medida, en este caso el Resguardo Indígena San Lorenzo de Caldone , textbfII) La medida tendrá una incidencia directa sobre el territorio porque sufriría una alteración con repercusiones en la identidad del grupo étnico, y en este sentido la Corte en diversos pronunciamientos, ha resaltado la importancia que tiene el territorio para las comunidades indígenas dado que éste no se reduce a un espacio físico, sino que, por el contrario, tiene un significado especial al relacionarlo con su cosmovisión y tradiciones asignándole un carácter ancestral y sagrado con incidencia en su desarrollo político económico, social y cultural. textbfIII) El territorio es una de las materias o contenidos a los que se refiere el Convenio 169 de la OIT.

En conclusión, si en este caso se llegare a omitir el procedimiento de consulta previa, supondría la vulneración de un derecho constitucional y se estaría poniendo en peligro la identidad étnica y cultural del resguardo indígena San Lorenzo.

### 2.3.3. Caracterización general físico espacial

El antiguo ETCR Los Monos se encuentra ubicado en las veredas Santa Rosa y Gualo donde hay presencia de los resguardos San Lorenzo de Caldon y Pueblo Nuevo, en el cual se atienden 438 personas en proceso de reincorporación (según la ARN se tiene una potencial demanda de personas en reincorporación para atención con vivienda de 69 )Agencia para la Reincorporación y la Normalización (2020). Todas que se auto reconocen en un 95 % como población indígena, adscritos al grupo étnico Nasa (Alcaldía de Caldon, 2020).

El asentamiento si bien está configurado bajo un modelo transitorio, cuenta con los servicios de agua, energía eléctrica y diferentes espacios como infraestructuras de apoyo: Aula de clase, salón comunal, guardería, comedor, cancha y un auditorio abierto los cuales se vienen estableciendo como equipamientos al servicio de los habitantes del antiguo ETCR y de las comunidades aledañas. En el proceso de consolidación de dicho asentamiento algunos de los módulos habitacionales han transformado su uso privado para adaptarlos a otros usos comerciales y de servicios.

Es evidente la carencia de intervenciones urbanísticas apropiadas como vías, andenes, zonas verdes y espacios comunes que estén al servicio de la comunidad y que permitan generar un mayor arraigo y permanencia.

Por lo tanto, se espera que con la consolidación del asentamiento se lleven a cabo espacios que consideren la ubicación de usos complementarios a la vivienda en los cuales puedan desempeñar y ubicar sus actividades productivas, espacios comunes donde ocupen su tiempo libre con espacios abiertos y paisajismo adecuado.

### 2.3.4. Norma general territorial aplicable al predio

Para el desarrollo del presente estudio se tomó como referencia el **Acuerdo 023 de Enero de 2006** por el cual se adopta el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT). Sin embargo, pese a que se tuvo conocimiento de la existencia de un Acto Administrativo previo correspondiente al **Acuerdo 005 de diciembre de 2005**, éste no fue suministrado y por lo tanto no fue posible establecer las variaciones entre uno y otro.

**Los siguientes son los elementos determinantes de la norma aplicables al predio donde se tiene previsto desarrollar el proyecto habitacional:**

## Normas urbanísticas municipales.

### Clasificación suelo.

Suelo Rural: 4,46 Ha.



Figura 33: Clasificación Suelo antiguo ETCR Los Monos (Municipio de Caldoño).

### Usos del suelo

**Uso principal.** El predio está definido dentro de las categorías de reforestación o revegetalización definidas en los artículos 31 y 34 del PBOT, donde se permite para estas las acciones encaminadas a la restitución de la cobertura vegetal en condiciones similares a las formaciones primarias, especialmente con especies nativas. (Regeneración Natural).

### Determinantes de ordenamiento territorial.

**Restricciones ambientales:** El predio no tiene restricciones de tipo ambiental en términos de suelos de protección, reservas forestales, cuerpos de agua, amenazas e infraestructuras de servicios públicos.

**Resguardo indígena:** No se traslapa con resguardo indígena. Pero si es una

zona de pretensiones étnicas indígenas de la comunidad Caldono del año 1970. Fuente: ANT, Shape Resguardo Indígena Colonial.

**Vías:** No hay presencia de vías de primer, segundo o tercer orden. Se presenta vía de acceso al predio.

### **Intensidades de usos según norma urbanística:**

**Densidades:** El PBOT no considera las densidades rurales, y al tampoco estar reglamentadas por la Corporación Autónoma Regional en virtud de lo establecido en el Numeral 31, Artículo 31 de la Ley 99 de 1993, se aplican entonces las densidades Rurales establecidas por el INCORA mediante Resolución 041 de 1996, con la finalidad de generar un ejercicio de aplicación de norma urbanística, anotando que en el momento en que la CAR adopte la reglamentación de densidades de vivienda en cerros, montañas y suelos suburbanos aplicarán las allí establecidas:

Aplicación densidad INCORA: UAF de 1viv/14ha-19ha

Número Máximo de viviendas Por Ha (densidad): 0,071428571

En los artículos 82 y 83 definen la vivienda de interés social rural y la vivienda rural, y no establecen las densidades.

En el artículo 97 en relación a las actuaciones que requieren licencia regula lo siguiente:

Para adelantar obras de construcción, ampliación, modificación y demolición de edificaciones, de urbanización y parcelación en terrenos urbanos, de expansión urbana y rural, se requiere licencia expedida por el municipio. Esta licencia deberá tener en cuenta la disponibilidad de servicios públicos, especialmente de acueducto y alcantarillado.

Igualmente se requerirá licencia para el loteo o subdivisión de predios para urbanizaciones o parcelaciones en toda clase de suelo, así como para la ocupación del espacio público con cualquier clase de amoblamiento

### **2.3.5. Cálculo de aprovechamientos urbanísticos o intensidad en los usos del suelo.**

El cálculo de aprovechamientos urbanísticos del predio se realiza a partir de la determinación del **área neta urbanizable** que se muestra en la Figura 34, la cual es la resultante de descontar del área bruta del predio, las áreas para la localización de la infraestructura para el sistema vial principal y de transporte, las redes primarias de servicios públicos, las áreas de conservación

y protección de los recursos naturales y paisajísticos y demás afectaciones del predio, multiplicado por la densidad habitacional definida por el PBOT.

Para el caso del predio Los Monos, al no tener restricciones de tipo ambiental como suelos de protección, toda su área se determina como área neta urbanizable para el ejercicio de cabidas, haciendo la salvedad que los usos del suelo del PBOT y las densidades asignadas para el suelo rural condicionan las actuaciones sobre esta zona dado que solo permite acciones encaminadas a la restitución de su cobertura vegetal.



Figura 34: Área Neta Urbanizable en el antiguo ETCR La Fila (Municipio de Icononzo). Fuente: Cartografía PBOT - Municipio de Icononzo.

En la siguiente tabla 3, se presentan los resultados que arroja el cálculo de densidades sobre el predio Los Monos luego de aplicarle las normas anteriormente descritas donde la densidad es de 0.071 viv/ha:

Tabla 3: Cálculo de aprovechamientos para predio Los Monos.

<b>Resultados Obtenidos</b>

Continuación de la tabla 3	
INFORMACIÓN PREDIAL	CALDONO
Nombre del predio	Los Monos
Vereda	Santa Rosa y Gualo
Área jurídica (Fuente: Matricula Inmobiliaria)	4 Ha + 4625 m <sup>2</sup>
Área Dibujo	4,46Ha
Intensidades de usos según norma urbanística	NA
Densidades	
<b>Para parcelación y construcción rural</b>	No considera las densidades rurales en PBOT, densidades no reglamentadas por Autoridad Ambiental Aplicación residual densidad INCORA: UAF de 1viv/14ha-19ha
Número Máximo de viviendas Por Ha (densidad)	0,071428571
Dispersas	NA
Agrupadas	NA
Dispersas	NA
Agrupadas	NA
<b>Vivienda Campestre</b>	
Área mínima de predio	NA
Índice de construcción	NA
Otras restricciones	NA
Índice Máximo de Ocupación	NA
Índice Máximo de Construcción	NA
Aislamiento Lateral Mínimo	NA
Aislamiento contra vías	NA
Número de Pisos	NA
Altura máxima	NA
<b>Calculo de aprovechamientos</b>	
Área de lote (ha)	4,46

Continuación de la tabla 3	
Área no urbanizable (restricciones)	0
Área neta urbanizable	4,46
Total aprovechamiento máximo (viviendas)	0,32
Final de la tabla	

De acuerdo a estos resultados y de cara a la viabilización del proyecto de vivienda del antiguo ETCR Los Monos en el predio objeto de estudio, donde con la norma urbanística vigente el aprovechamiento máximo es de 0.32 viviendas, se hace necesario que desde la norma se habilite un aprovechamiento mayor que conlleve al incremento del índice de suburbanización en los términos del artículo 2.2.2.2.1 del Decreto Nacional 1077 de 2015.

## 2.4. Conclusiones

A partir de los resultados de la evaluación del predio en el marco de la normativa territorial existente, se presentan las siguientes conclusiones desde el ámbito espacial; al igual que desde el punto de vista de lo que conllevaría acoger alguna de las rutas jurídicas de implementación del antiguo ETCR que fueron propuestas y desarrolladas en el presente documento, esto con miras a lograr la viabilización del proyecto urbanístico en el predio donde se albergará la población del antiguo ETCR del municipio de Caldonó.

- La existencia de condicionantes previamente definidas, relativas a la localización del predio en suelo rural y al otorgamiento de subsidio de vivienda rural para albergar un proyecto de alta densidad poblacional, se convierten en elementos que inciden al momento de aplicar la norma urbanística en cuanto a densidades, usos del suelo y restricciones de tipo ambiental. Aunado a lo anterior, el modelo propuesto para el antiguo ETCR como proyecto habitacional hace que el área urbanizable de los predios por su dimensión sea insuficiente para albergar altas densidades en este tipo de suelo según la norma urbanística vigente.
- El predio no tiene restricciones de tipo ambiental, sin embargo, los usos del suelo del PBOT establecen para esta zona las categorías asociadas a la

reforestación o revegetalización encaminadas a la restitución de la cobertura vegetal en condiciones similares a las formaciones primarias, especialmente con especies nativas (Regeneración Natural).

- No se establecen densidades rurales para el territorio municipal, por tanto se aplican las definidas por el INCORA mediante Resolución 056 de 1996 según la cual le corresponde 1viv/14ha-19ha UAF.
- La propiedad en el antiguo ETCR Los Monos tiene una connotación especial, toda vez que sus habitantes pertenecen a un territorio indígena donde la propiedad privada no se concibe de la misma forma que en otras zonas del país, donde ésta tiene un sentido económico y jurídico. Por el contrario, las comunidades indígenas como lo ha dicho la Corte, están unidas a sus territorios de manera comunitaria, espiritual y cosmogónica, concediéndole un carácter ancestral y sagrado; lo cual obliga a que al momento de estructurarse en estas zonas un modelo de vivienda se tenga en cuenta sus formas de vida y de ocupación del territorio.
- En cualquiera de los escenarios de revisión de PBOT y al estar el proyecto de vivienda en territorios de influencia de comunidades indígenas, la generación de nuevas normas urbanísticas implica agotar el procedimiento de Consulta Previa en los términos del Convenio 169 de la OIT, tal como lo estableció la Corte Constitucional en Sentencia T-576 de 2014. En instancia de Consulta, reitera el Consejo de Estado que cuando se trate de Planes de Ordenamiento Territorial, y que en su trámite se realicen cambios excepcionales que directamente afecten intereses de comunidades étnicas, estos deben tener una instancia de participación diferencial en la que se les satisfaga el derecho de Consulta previa del que poseen titularidad (Consejo de Estado, Sala de Consulta y Servicio Civil, Rad. 2172, 2014), dicho proceso se surtiría en la etapa de concertación del proyecto de PBOT, según lo establecido en el artículo 24, numeral 4 de la Ley 388 de 1997.
- El PBOT del municipio de Caldonio tiene una condición particular y es que sólo se aprobó en su primera generación en 2005 y nunca ha sido objeto de revisión, motivo por el cual no han sido introducidas entre otras en el componente rural los Decretos 097 de 2006 y 3600 de 2007, incorporados en el Decreto Único 1077 de 2015, en lo referente a la regulación de contenidos del componente rural de PBOT, lo cual induce a que para el caso

de municipio de Caldono el instrumento óptimo es la revisión ordinaria de largo plazo.

- Dado que en el Plan de Desarrollo de Caldono 2020- 2023 “Pacto de Unidad para El Cambio Social de Caldono” (Acuerdo 004 de 2020) no contempla claramente la revisión del PBOT.
- En caso de adelantarse la revisión ordinaria de largo plazo del PBOT o la modificación excepcional de norma urbanística con el fin de lograr la incorporación del antiguo ETCR en la norma territorial, tendría que efectuar entre otros asuntos, la modificación de la clasificación del suelo al igual que incrementar el umbral de suburbanización (norma objeto de concertación ambiental), de acuerdo con lo establecido en el Artículo 2.2.2.2.1 del Decreto Nacional 1077 de 2015.
- Para el Municipio de Caldono el ejercicio de simulación de norma urbanística a partir de la demanda de vivienda requerida por los excombatientes de las FARC-EP arrojó una densidad de (48.32 Viv/ha ) que superan las densidades propias del suelo rural, se recomienda incorporar el antiguo ETCR como Centro Poblado Rural Proyectado, lo cual obliga a ajustar el Artículo 2.2.2.2.3.1 del Decreto Único Nacional 1077 de 2015, por cuanto dicha norma solo está concebida para categorizar dentro del PBOT áreas habitacionales preexistentes (asentamientos humanos) a la revisión y ajuste del PBOT.
- Dentro de la ruta propuesta de modificación excepcional de norma urbanística para la viabilización del antiguo ETCR en el corto plazo, se sugiere adicionar un artículo en el Decreto 1077 de 2015 que habilite la modificación excepcional de norma urbanística así los contenidos de largo plazo del POT se encuentren vencidos, para efectos de modificar las clases, categorías y usos del suelo; así mismo, se posibilite el ajuste de los objetivos y estrategias de largo plazo y hasta permita ampliar la vigencia, todo esto con el fin de dar cumplimiento a lo pactado en el acuerdo de paz con las estructuras de las extintas FARC-EP.
- En lo que respecta a la tercera ruta propuesta, la expedición de la Ley de Vivienda 2079 de 2021 que viabiliza normativamente los antiguos ETCR en su artículo 33 establece las pautas para su incorporación de la norma

urbanística en los planes de ordenamiento territorial, tal como lo indica su parágrafo 2o:

“El Gobierno Nacional informará a los municipios la decisión sobre la ejecución de estos proyectos, y deberá entregarles la información pertinente, la cual incluirá las normas urbanísticas básicas para la consolidación de los antiguos ETCR, con el fin que sea tenida en cuenta en el proceso de revisión y ajuste de los Planes de Ordenamiento Territorial de los municipios.”

En este evento, el gobierno nacional entrega el proyecto de norma urbanística para que el municipio lo incorpore en su proceso de revisión y ajuste de POT (vía revisión ordinaria o modificación excepcional) y solo hasta que esta condición se cumpla, se entendería incorporada en el PBOT, en el entendido de no generase norma que determine el procedimiento de incorporación en el Ordenamiento Municipal, se recomienda reglamentar el artículo con la finalidad de establecer un procedimiento excepcional, autónomo y rápido no sujeto a ajuste de PBOT.

- El ajuste normativo que el municipio de Caldono emprenda con miras a lograr la incorporación del antiguo ETCR en el PBOT, deberá enfocarse mínimamente en la modificación e incorporación de los siguientes artículos, los cuales se consideran necesarios para el otorgamiento de las respectivas licencias urbanísticas de parcelación, construcción y autorización de subdivisión, cuando ello aplique:

Tabla 4: Propuesta general de modificación e incorporación de artículos revisión PBOT.

ITEM	Disposición Principal Propuesta	Localización En el ajuste al PBOT	Observación
Clasificación del suelo	Clase de suelo rural	Art 15. Sin cambios	Disposición objeto de concertación ambiental y Adopción mediante Acuerdo POT

Categoría del suelo rural	Suelo suburbano	Ajustar contenidos del Art 21	Disposición objeto de concertación ambiental y Adopción mediante Acuerdo POT
Umbral de suburbanización	Crear el umbral	Insertar disposición en el Componente Rural	Disposición objeto de concertación ambiental y Adopción mediante Acuerdo POT
Hechos generadores de plusvalía	El cambio de clase de suelo rural a suelo suburbano se considera hecho generador	Nuevo artículo	Adopción mediante Acuerdo POT
Definición de porcentaje de participación el plusvalía	30 % del plusvalor	Nuevo artículo	Adopción mediante Acuerdo POT
<b>Normas de Parcelación</b>			
Definiciones generales	Definición de área bruta, área neta urbanizable y área útil	Nuevo artículo	Adopción mediante Acuerdo POT
Secciones viales mínimas y senderos	6m de ancho	Nuevo artículo	Adopción mediante Acuerdo POT

Cesiones urbanísticas para espacio públicos de orden local (vías, espacio público, suelo para equipamientos)	20 % del ANU	Nuevo artículo	Adopción mediante Acuerdo POT
Uso del suelo principal	Vivienda (30 % ANU) Agrícola (30 % ANU)	Ajustar Capítulo II	Adopción mediante Acuerdo POT
Usos del suelo complementarios	Comercio menor Usos dotacionales (20 % ANU)	Ajustar Capítulo II	Adopción mediante Acuerdo POT
Antejardín	4m de ancho	Nuevo artículo	Adopción mediante Acuerdo POT
Densidades habitacionales	15 viv/ha	Nuevo artículo	Disposición objeto de concertación ambiental y Adopción mediante Acuerdo POT
Área mínima de lote	500m <sup>2</sup>	Nuevo artículo	Adopción mediante Acuerdo POT
Frente mínimo de lote	20m	Nuevo artículo	Adopción mediante Acuerdo POT
Índice máximo de Ocupación	30 % ANU	Nuevo artículo	
<b>Normas de construcción</b>			
Área mínima de vivienda	45m <sup>2</sup>	Nuevo artículo	Adopción mediante Acuerdo POT

Área máxima de local	250m <sup>2</sup>	Nuevo artículo	Adopción mediante Acuerdo POT
Altura máxima de la edificación	2 pisos	Nuevo artículo	Adopción mediante Acuerdo POT
Retiro de edificación a lindero	5 metros	Nuevo artículo	Adopción mediante Acuerdo POT
Iluminación y ventilación	Todos los espacios con iluminación directa a través de fachada o patio	Nuevo artículo	Adopción mediante Acuerdo POT
Condiciones mínimas de habitabilidad	Un baño, cocina, salón común, ventanas, puerta de baño, puerta principal, piso en mortero	Nuevo artículo	Adopción mediante Acuerdo POT

La propuesta de modificación normativa que se acaba de presentar responde a un ejercicio hipotético que necesariamente tendrá que ser ajustado una vez se tenga el planteamiento urbanístico definitivo del antiguo ETCR.

- **Justificación de la creación de un nuevo Centro Poblado Rural.** El estudio evidencia la necesidad de que los antiguos ETCR sean viabilizados normativamente a través de su incorporación como Centros Poblados proyectados (siempre y cuando se modifique el Decreto 1077 de 2015 en su Artículo 2.2.2.2.3.1) razón por la cual, a continuación se plasman las consideraciones que justifican la creación de estos asentamientos humanos.

Los antiguos ETCR fueron concebidos como espacios temporales para albergar un número significativo de reincorporados que conforme a lo pactado en el Acuerdo de Paz eje temático – Reforma Rural Integral, quedaron a la espera de la creación de condiciones de permanencia para el acceso a la tierra, a la vivienda, a bienes y servicios públicos en un ambiente rural y en equilibrio con la naturaleza.

Bajo esa premisa el Centro Poblado toma relevancia y se convierte en la figura que permite visualizar los antiguos ETCR como espacios permanentes y de oportunidad para configurar físicamente asentamientos humanos nucleados con una mirada desde la planificación territorial, donde exista la posibilidad de definir el lugar que se ocupará y cómo se intervendrá de acuerdo al perfil sociocultural de los futuros habitantes, garantizando que desde su adopción o viabilización urbanística se asegure un desarrollo planificado desde lo físico, ambiental y funcional.

Para el DANE los Centros Poblados son *“una concentración de mínimo veinte (20) viviendas contiguas, vecinas o adosadas entre sí, ubicadas en el área rural de un municipio o de un corregimiento departamental. Dicha concentración presenta características urbanas tales como la delimitación de vías vehiculares y peatonales”*.

El Decreto 1077 del 2015 en su artículo 2.2.1.1 define el concepto de Asentamientos humanos rurales como *“un núcleo de población conformado por vivienda agrupada en suelo rural, localizado en un área delimitada, que comparte infraestructura y dinámicas sociales y económicas”*.

Así mismo, desde lo territorial se han identificado unas características especiales que deben cumplir los Centros Poblados, como es tener asociado un nombre que le de identidad, la vocación de arraigo por parte de sus habitantes con intereses comunes en el ámbito económico, social, cultural e histórico, con casas contiguas que permitan configurar un urbanismo que soporte las actividades propias del conglomerado. Así entonces, estos espacios deben contar con identidad propia, carácter de permanencia en el tiempo, donde las comunidades que los habitan puedan incorporarse a los entes municipales e integrarse a la sociedad en sana convivencia y con el pleno goce de sus derechos como ciudadanos.

Lo ideal para que se logre la materialización de los antiguos ETCR sería que el proyecto de vivienda, garantice un relacionamiento, y articulación

entre:

**Su lugar de trabajo:** El Campo/ zonas productivas y  
**Su lugar de residencia e intercambio económico:** el Centro Poblado, la cabecera municipal y la región.

Lo anterior es básico para garantizar la permanencia del nuevo centro poblado en el tiempo, cuando sus pobladores dependan de su ingenio, capacidad social y económica para habitar en las mejores condiciones posibles. A partir de la norma de creación de los antiguos ETCR inicialmente con vocación de transitoriedad y posteriormente de permanencia, se estableció que estuvieran ubicados en suelo rural; sin embargo, como las normas urbanísticas aplicables al suelo rural son restrictivas para el desarrollo de usos con características urbanas, se deben explorar otras posibilidades de suelos que habiliten una mayor densidad y diversidad de usos sin ir en detrimento de las condiciones ambientales de las zonas donde se ubiquen estos espacios territoriales.

No obstante, lo anterior, y bajo la premisa que se tiene derivada del Acuerdo de Paz de ubicar a los antiguos ETCR en suelo rural y de otro lado, establecida la figura jurídica del **Centro Poblado rural** como una opción para la formalización de los antiguos ETCR en el ordenamiento territorial municipal, se presenta el siguiente ejercicio de cálculo de densidades:

■ **Propuesta de densidades:**

De cara una posible revisión de la norma territorial y a la concertación de los asuntos ambientales y de densidades rurales con la CAR, se propone gestionar un incremento de densidades en aquellas áreas que resultado del presente ejercicio son urbanizables para viabilizar el desarrollo del proyecto habitacional en el antiguo ETCR Los Monos.

De acuerdo con lo anterior, a modo de ejemplo y sustento para la concertación de densidades con la CAR, *se tomó como criterio la densidad del **Centro Poblado – Pueblo Nuevo**-- (Figura35) por estar más cercano y de escala similar a la que se tiene previsto se convertirá el antiguo **ETCR Los Monos** en el corto plazo*

Para este ejercicio se acogió la información Dane del Censo Nacional de Población y Vivienda-CNPV 2018: Área zona urbana (centro poblado), viviendas, hogares y personas (5).

En este sentido se estima que el Centro Poblado que albergará el antiguo ETCR tendrá una densidad propia en la medida que las condiciones físicas sean similares a la del Centro Poblado tomado como referencia. En consecuencia, a partir del dato extraído de la información DANE 2019 con relación al Centro Poblado de referencia, se establecen las siguientes densidades existentes partiendo de la hipótesis que el área del polígono es totalmente urbanizable Tabla 6:

De acuerdo a lo anterior y tomando la información de la tabla se hará, el cálculo de cuantas viviendas es posible localizar con base la densidad del Centro Poblado de Referencia Pueblo Nuevo.

Si la densidad de **14,44 Viv/Ha** del Centro Poblado de referencia se aplicara para el área neta urbanizable del predio Los Monos (antiguo ETCR Los Monos) que tiene **4,46 Ha**, en el predio se podrían construir un total de **64,4 viviendas**.



Figura 35: Centro Poblado de referencia Pueblo Nuevo (Caldono)

Tabla 5: Información Centro Poblado de referencia

AETCR	MUNICIPIO	NOM_CPOB	DATOS_ANM	AREA	STVIVIENDA	TPS16_HOG	STP27_PERS
CALDONO	CALDONO	PUEBLO NUEVO	ZONA URBANA (CENTRO POBLADO)	1911184,4179	276	354	1156

**CONVENCIONES TABLA:**

ÁREA: Área del departamento en metros cuadrados (Sistema de coordenadas

MAGNA\_Colombia\_Bogotá)

STVIVIENDA: Conteo de viviendas

TSP16\_HOG: Conteo de hogares

STP27\_PERS: Número de personas

Tabla 6: Calculo de la densidad del centro poblado de referencia

Variables	Unidades	Caldono
Nombre Centro Poblado referente		Pueblo Nuevo
Área aproximada del centro poblado	ha	19,1184
Cantidad aproximada de viviendas	viv	276
Densidad habitacional referente	viv/ha	14,44

# Referencias

- Agencia para la Reincorporación y la Normalización. (2020). *AETCR llanogrande*. Descargado 2020-11-25, de [http://www.reincorporacion.gov.co/es/reincorporacion/Paginas/ETCRs/AETCR\\_los\\_monos.aspx](http://www.reincorporacion.gov.co/es/reincorporacion/Paginas/ETCRs/AETCR_los_monos.aspx)
- Consejo de Estado. (2013). *El plan de ordenamiento territorial (POT) de Bogotá D.C. vigencia del POT. Procedimiento de modificación excepcional de las normas urbanísticas del POT. Competencias del Concejo Distrital y del alcalde mayor para adoptar y modificar el POT*. Descargado de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=64954>
- Procuraduría General de la Nación. (2013). *Proceso de revisión y ajuste de planes de ordenamiento territorial*. Descargado de <https://ww2.camacolcundinamarca.co/documentos/Conceptos-juridico/9.pdf>

**Parte II**

**Viabilidad Sanitaria**

## Capítulo 3

# Viabilidad Sanitaria

### Introducción

Dentro de la Viabilidad Sanitaria del antiguo ETCR se encuentra la evaluación y los diseños que permiten garantizar el recurso hídrico que surtirá la planta de tratamiento del agua de consumo y las aguas residuales generadas, con base en la normatividad que rige cada una y dando cumplimiento a los criterios requeridos en cada uno de los procesos de tratamiento.

En el presente capítulo se evalúan las características municipales del antiguo ETCR, la localización de la zona de estudio, evaluando los drenajes y disponibilidad hídrica que se encuentran enmarcados en los criterios normativos, económicos y técnicos con base en la información recopilada para realizar la caracterización, selección de tecnologías a implementar y dimensionamiento de las estructuras hidráulicas de tratamiento de agua.

### 3.1. Variables del diseño

Para efectos del claro entendimiento del informe de viabilidad sanitaria en el antiguo ETCR se definen a continuación los términos a usar:

- **Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP):** Hace referencia a la planta donde se establece el tratamiento de agua para consumo humano.
- **Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR):** Hace referencia a al lugar de tratamiento de las aguas servidas residuales domésticas.
- **Periodo de diseño ( $P_d$ ):** El tiempo proyectado de diseño de las obras de saneamiento básico. A este periodo se proyecta la población de la zona de actuación.

- **Zona de Actuación:** Delimitación geográfica del área de un proyecto de agua para consumo humano o de saneamiento básico.
- **Agua para consumo humano:** Agua que puede ser utilizada por humanos para beber, cocinar, preparar alimentos, higiene personal y el lavado de utensilios de cocina.
- **Población futura ( $P_f$ ):** Proyección de población en la zona de actuación de un proyecto de agua para consumo humano o de saneamiento básico.
- **Tasa de crecimiento poblacional ( $r$ ):** Es la tasa de cambio en porcentaje del total de población año a año.
- **Caracterización del agua:** Evaluación de los principales componentes del agua cruda o residual y su concentración.
- **Tratamiento biológico:** Es el proceso de descomposición biológica de materia orgánica presente en las aguas residuales.
- **Caudal de diseño:** Es el valor del caudal de agua que se toma para el diseño de las diferentes estructuras hidráulicas.

### 3.2. Normatividad

El diseño de los sistemas y/o componentes de acueducto, alcantarillado y plantas de tratamiento de agua se rige bajo las disposiciones y recomendaciones contenidas en las siguientes normas y decretos:

- Reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico RAS resolución de 0330 de 2017.
- Resolución 0844 de 2018, donde se presentan los lineamientos para el diseño de sistemas de acueducto y saneamiento básico rurales.
- Decreto 1575 de 2007, el cual se determina los lineamientos del sistema para la protección y control de la calidad del agua para el consumo humano.
- Decreto 2115 de 2007, en el cual se establece los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y los rangos que se deben cumplir para que el agua tratada cumpla con la condición de ser apta para consumo humano, además establece las características químicas que tienen efecto negativo sobre la salud humana.

- Decreto 1594 de 1984, Usos del agua y residuos líquidos.
- Decreto 3930, usos del agua y vertimientos. 134
- Resolución 0631 de 2015. Parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.

### 3.3. Proyección poblacional

Actualmente, se establece una cantidad total de 438 viviendas habitables en el antiguo ETCR. Con esta información inicial se establece un sistema de tratamiento acorde con las condiciones de entorno de la zona, de las características poblacionales, de los requerimientos de uso del agua y de la disponibilidad del recurso hídrico a tener en cuenta para el correcto diseño de las plantas de tratamiento de aguas y así garantizar una viabilidad sanitaria en la zona de actuación.

La evaluación del crecimiento de la población a lo largo de un periodo de diseño es un elemento fundamental para realizar el planteamiento y diseño detallado de cualquiera de los elementos que componen los sistemas de agua potable y saneamiento básico (de Desarrollo Económico, 2000).

El primer paso para realizar la proyección de la población y la estimación de los caudales de demanda y diseño de los sistemas de acueducto y saneamiento básico es la recolección y el análisis de la información existente. Se debe tener en cuenta así la información de:

- Censos de población efectuados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) durante los años 1938, 1951, 1964, 1973, 1985, 1993. Algunos de estos involucran censos de vivienda.
- Proyecciones recientes de población efectuadas por el DANE.
- Estimaciones de población actual y futura contenidas en los planes de desarrollo y en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) del municipio o zona a evaluar.
- Censos de los suscriptores a servicios públicos de la zona de evaluación.
- Información SISBEN referente a número de viviendas, familias y personas.

- Informes existentes de la zona donde se involucre el planeamiento de cualquier servicio público.

Con base en la información recolectada en campo por el equipo social, se tiene un número inicial de 438 viviendas que componen el antiguo ETCR Los Monos y con una densidad poblacional de 4 personas por vivienda, se realiza la proyección de la población para un periodo de diseño de **25 años** según la resolución 0844 de 2018 que establece los lineamientos de diseño para sistemas de acueducto y saneamiento básico (Ministerio de Vivienda, 2018).

Al carecer de una tasa de crecimiento poblacional del antiguo ETCR se toma como tasa un valor de **0,5 %** establecido de acuerdo a los lineamientos de la resolución 0844 de 2018 (Ministerio de Vivienda, 2018).

### 3.3.1. Modelo de proyección de población

Para proyectar la población en la zona de actuación de un proyecto de saneamiento básico se tienen diferentes modelos de proyección especificados en el RAS 2000 (de Desarrollo Económico, 2000), pero debido a la falta de información sobre censos en el antiguo espacio territorial Los Monos se establece como modelo de proyección para el antiguo ETCR el método Geométrico, que es viable para cualquier nivel de complejidad en el sistema de acueducto y saneamiento básico.

La ecuación que emplea el método Geométrico para la proyección de la población futura es:

$$P_f = P_{uc} \cdot (1 + r)^{T_f - T_{uc}} \quad (3.1)$$

Donde:

- $P_f$ : Población futura proyectada.
- $P_{uc}$ : Población registrada de último censo.
- $r$ : Tasa de crecimiento poblacional.
- $T_f$ : Año al cual se requiere la proyección poblacional.
- $T_{uc}$ : Año del último censo.

Tomando la población actual del año 2020 de 1752 habitantes (438 viviendas cada una con 4 habitantes) y una proyección planeada al año 2046, se encuentra

un valor de población futura de **1995** habitantes en el antiguo ETCR (Ver Tabla 7).

Tabla 7: Proyección poblacional para los años establecidos en el periodo de diseño

<b>PROYECCIÓN POBLACIONAL</b>	
<b>Año</b>	<b>Geométrico</b>
2020	1752
2021	1761
2022	1770
2023	1778
2024	1787
2025	1796
2026	1805
2027	1814
2028	1823
2029	1832
2030	1842
2031	1851
2032	1860
2033	1869
2034	1879
2035	1888
2036	1898
2037	1907
2038	1917
2039	1926
2040	1936
2041	1945
2042	1955
2043	1965
2044	1975
2045	1985
2046	1995

Con esta población futura estimada para el antiguo ETCR Los Monos se realiza el cálculo de los caudales de diseño para cada uno de los sistemas de

agua potable y saneamiento básico.

### 3.4. Caudales de diseño

Para la estimación de los caudales de diseño de los sistemas de acueducto y saneamiento básico de el antiguo ETCR Los Monos, es necesario el análisis de la demanda total de agua requerida en la zona de actuación. Para encontrar dicha demanda de agua se establece una dotación de agua por habitante usuario de sistema, la demanda total será así la multiplicación de la población que va a ser servida por la dotación.

Dentro del planteamiento del sistema de acueducto y saneamiento básico solo una adecuada definición de las variables de proyección poblacional y dotación por habitante permite el planteamiento de obras que garanticen una óptima inversión de los recursos sin llegar a ninguno de los dos extremos: La generación de un lucro cesante por el sobredimensionamiento de la demanda o la insuficiencia a corto plazo de las obras propuestas por el subdimensionamiento de las mismas (de Desarrollo Economico, 2000).

#### 3.4.1. Dotación de agua

Para la dotación de agua se determina la dotación bruta ( $d_{bruta}$ ), y para esta intervienen dos variables importantes: la dotación neta ( $d_{neta}$ ) y las pérdidas en el sistema ( $\%P$ ). El RAS 2000 (de Desarrollo Economico, 2000) define la  $d_{bruta}$  como:

$$d_{bruta} = \frac{d_{neta}}{1 - \%P} \quad (3.2)$$

Donde la dotación neta o  $d_{neta}$  se establece como la cantidad de agua que requiere un habitante o usuario del servicio de acueducto para satisfacer sus necesidades normales, sin considerar las pérdidas en el sistema. Mientras la dotación neta en un parámetro que se puede enmarcar dentro de un rango de valores mínimos y máximos, las pérdidas de agua son un parámetro particular y propio de cada sistema de acueducto y pueden variar dependiendo de la zona, de las condiciones físicas de la red y de sus condiciones operativas.

Por otro lado, en el documento “Agua para el siglo XXI para América del Sur. De la visión a la acción. Informe nacional sobre la gestión del agua en Colombia” en relación con el rango de consumo básico definido en Colombia, se menciona lo siguiente: “El consumo promedio de los hogares rurales con servicio de agua potable es de  $120 \text{ litros/habitante} - \text{día}$ . Estas cifras superan el volumen de 80 litros mínimo necesario para la calidad de vida razonable” (del Carmen Santana, Tovar, y Sotomayor, 2015).

Tabla 8: Usos del agua en viviendas.

Hogares	Usos %	Litros
Consumo propio	3,9 %	4,68
Ducha	20,9 %	25,08
Sanitario	19,9 %	23,88
Lavamanos	3,7 %	4,44
Lava platos	15,5 %	18,60
Lavado de ropa	27,1 %	32,52
Aseo vivienda	4,9 %	5,88
Riego de plantas	0,7 %	0,84
Lavado de vehículo	1,5 %	1,80
Riego jardines	1,9 %	2,28
<b>Total</b>	<b>100 %</b>	<b>120,00</b>

Tomando en cuenta lo anterior y con base en los lineamientos planteados por la resolución 0844 de 2018 que establece las características de diseño para sistemas de acueducto y saneamiento básico rurales (Ministerio de Vivienda, 2018), se realiza entonces una evaluación de la dotación neta con base en el artículo 32 de la resolución anteriormente mencionada, escogiendo un valor de  $d_{neta}$  de  $120 \text{l/hab} \cdot \text{día}$  distribuidos según la Tabla 8 y con un porcentaje de pérdidas en el sistema de acueducto rural de **25 %**.

Para determinar el caudal y por corresponder a población rural, es necesario aplicar a la resolución 0844 de 2018, Art. 32 donde se debe adicionar caudales de entorno que se sustentan en los volúmenes de subsistencia de las familias, los cuales son variables de acuerdo a las actividades económicas de cada antiguo ETCR, como no se tiene precisión con la dimensión de los volúmenes por actividad a requerirse, se asume un caudal de entorno del 10% del volumen

diario requerido, de acuerdo a la caracterización social de cada antiguo ETCR, las cuales se clasifican en las siguientes actividades:

Tabla 9: Volumen de subsistencia para el antiguo ETCR de estudio.

<b>Actividades de subsistencia Familia Rural</b>	
Agricultura	Plátano, Yuca, Maíz, Frijol, Cacao, Café, Ají, Maracuyá entre otros.
Cría de animales	Ganadería, Porcicultura, Piscicultura, Acuicultura.

El volumen de subsistencia (Tabla 9) es diario y se adiciona al caudal de diseño del sistema de acueducto y de tratamiento de agua potable, el cual se traduce en un valor de caudal de entorno o  $Q_E$  de **0,28 l/s** sin incluir pérdidas del sistema.

$$Q_E = \%_{asumido} \cdot \left( \frac{d_{neta} \cdot P_f}{86400} \right) \tag{3.3}$$

Lo que se traduce en un volumen de subsistencia de 48 l/vivienda-día en total para las actividades a desarrollar en el antiguo ETCR, donde se establece un uso del agua como lo indica la Tabla 10.

Tabla 10: Porcentaje de uso de agua de los proyectos productivos en la antiguo ETCR.

<b>Actividad</b>	<b>Usos %</b>	<b>Litros/vivienda</b>
Agricultura (Aguacate Hass y tomate de árbol)	30 %	14.4
Cría de animales (Cerdos, ganado y peces)	70 %	33.6
<b>Total</b>	<b>100 %</b>	<b>48</b>

### 3.4.2. Caudal de diseño sistema de tratamiento de agua potable

Continuando en base a la información anterior se establece entonces el caudal de diseño del sistema de tratamiento de agua potable, según la resolución 0844 (Ministerio de Vivienda, 2018), como:

$$Q_D = \frac{\left( \frac{d_{neta} \cdot P_f}{86400} \right) + Q_E}{1 - \%P} \tag{3.4}$$

Donde:

- $Q_D$ : Caudal de diseño en l/s.
- $d_{neta}$ : Dotación neta.
- $P_f$ : Población futura.
- $Q_E$ : Caudal de entorno.
- $\%P$ : Porcentaje de pérdidas del sistema.

Dando como resultado un caudal de diseño para el sistema de tratamiento de agua potable en el antiguo ETCR Los Monos de  $Q_D = 4,1$  l/s. Si se asume una operación en la PTAP de 22h debido a 2h de mantenimiento y limpieza de filtros se establece entonces un caudal de diseño de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) de **4,4** l/s.

### 3.4.3. Caudal de diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales

Igualmente como en el sistema de tratamiento de agua potable, para encontrar el caudal de diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales del antiguo ETCR se toma como base los lineamientos planteados en la resolución 0844 (Ministerio de Vivienda, 2018) que establece en el artículo 42, numeral b), seguir los lineamientos del artículo 32 numeral a) para encontrar el caudal de diseño del sistema, usando la ecuación:

$$Q_D = \frac{\frac{d_{neta} \cdot P_f}{86400}}{1 - \%P} \quad (3.5)$$

El caudal de diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales para el antiguo ETCR Los Monos es de **3,7** l/s y no es objeto de factores de mayoración de caudales según lo establecido en la resolución 0884 de 2018, artículo 42, numeral b).

### 3.4.4. Oferta hídrica

Esta sección presenta el cálculo para la estimación de la oferta hídrica de la fuente seleccionada para el abastecimiento del antiguo ETCR Los Monos. Se estima el caudal ambiental y la disponibilidad de agua superficial para diferentes condiciones hidrológicas.

### 3.4.4.1. Descripción de la fuente hídrica

La fuente hídrica de la cual se proyecta captar el agua para el uso del antiguo ETCR Los Monos se conoce como NN, es un cuerpo lótico de escorrentía superficial de agua dulce. Las coordenadas del punto de captación se presentan a continuación en la Tabla 11 con información adicional, las coordenadas se presentan en el sistema Magna Colombia Bogotá. En la Figura 36 se presenta el trazado de la cuenca hidrográfica correspondiente a dicha captación, la cuenca tiene un área de drenaje de 0,79 km<sup>2</sup>. Por otra parte, en la Figura 37 se presenta una fotografía del potencial sitio de captación.

Tabla 11: Características de la fuente abastecedora proyectada antiguo ETCR Los Monos

Características	Vegetación	Lecho	X	Y	Z (msnm)
Quebrada de buena vegetación aguas arriba, cuenca no antropizada.	Vegetación alta	Lecho en grava	739787,6	800627,8	2279

Para la estimación de la oferta hídrica de la microcuenca abastecedora objeto de este estudio en diferentes condiciones hidrológicas y climáticas es necesario estimar su régimen de caudales y poder, posteriormente calcular a la oferta y disponibilidad. El régimen de caudales se estima a partir de series diarias sintéticas de caudal que se obtienen con la ayuda de un modelo hidrológico agregado de lluvia – escorrentía.

El estudio de la relación entre la precipitación que ocurre sobre una cuenca y la correspondiente escorrentía que genera, es uno de los aspectos básicos del análisis hidrológico. La evaluación de esta relación ha sido objeto de numerosos estudios e investigaciones: desde las primeras formulaciones desarrolladas por (Mulvaney, 1851), se han desarrollado numerosos procedimientos y metodologías para su estudio. En este contexto surgen los modelos lluvia-escorrentía, los cuales son una valiosa herramienta que permite simular la producción de caudal de una cuenca hidrográfica ante la carencia de registros de medición. En esencia, estos modelos lo que buscan es emular y pronosticar algunos procesos dentro del sistema hidrológico.

Dado que no existe información específica de caudales para la microcuenca abastecedora proyectada para el antiguo ETCR, se implementa un modelo lluvia-escorrentía para suplir la ausencia de instrumentación. Si bien se cuenta con algunas estaciones de caudal aledañas, estas estaciones no se corresponden

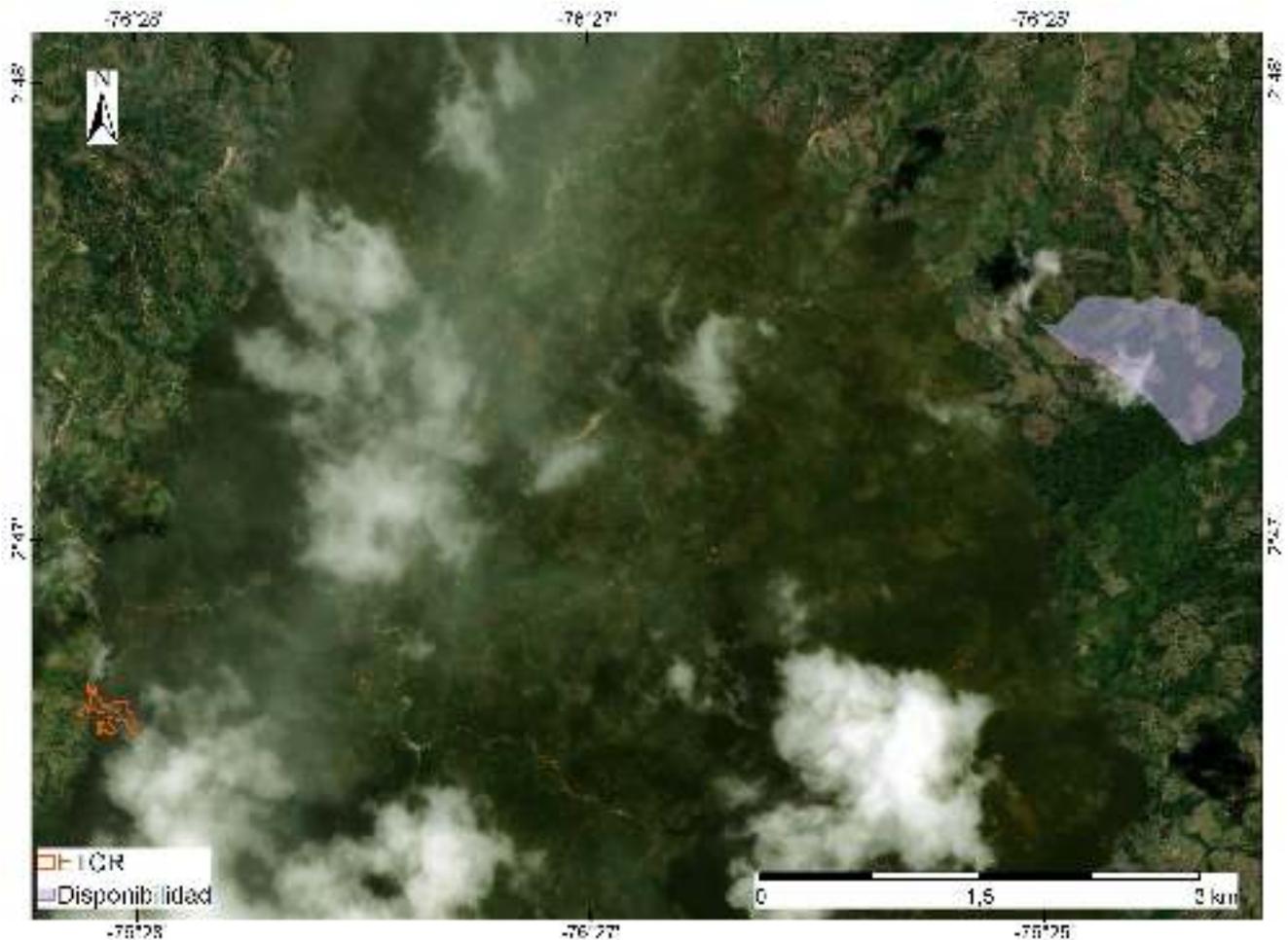


Figura 36: Cuenca del sitio de captación

estrictamente con la cuenca de trabajo, por lo que serán usadas fundamentalmente para la calibración del modelo específicamente la estación de IDEAM ubicada sobre el río Piendamó (código 26027090) la cual se presenta en la Figura 38.

En este estudio se aplica el Modelo Hidrológico Conceptual Agregado desarrollado por Vélez (2001) donde la resolución temporal diaria es adecuada para la estimación del régimen de caudales. El modelo se basa en la representación de diferentes componentes de la fase terrestre del ciclo hidrológico a través de cuatro tanques interconectados entre sí: uno representa el almacenamiento capilar, otro el flujo superficial, otro el flujo subsuperficial y otro el flujo subterráneo. Al ser un modelo conceptual configurado a partir de tanques, este modelo lluvia-escorrentía también recibe el nombre de “Modelo de Tanques”. Se realiza aquí una descripción somera del funcionamiento conceptual del modelo.

El modelo de tanques desarrollado por Vélez (2001) realiza un balance de la



Figura 37: Sitio de captación para antiguo ETCR Los Monos

cantidad de agua en cada uno de los tanques que lo conforman, actualizando los volúmenes de agua almacenados en cada uno. Uno de los principales insumos del modelo de tanques es la precipitación ( $X_1$ ), la cual se toma de registros diarios de estaciones que influyen el área de la cuenca, ponderando cuál es la contribución de cada una de estas estaciones. En cada uno de los nodos ( $D_i$ ) parte del agua se distribuye: una parte se dirige a uno de los tanques, y otra continúa hasta los niveles inferiores ( $X_i$ ). La cantidad de agua que sigue hasta los niveles inferiores dependerá de la cantidad de agua que quede disponible después de la derivación en el nodo, del estado de almacenamiento del tanque y de la conductividad hidráulica del nodo del conducto posterior al nodo. Cada tanque realiza una descarga ( $Y_i$ ), que depende del volumen almacenado en el tanque.

A partir del segundo tanque, cada una de estas descargas corresponde a los diferentes aportes que se realizan al caudal: el aporte por escorrentía directa, el aporte por flujo subsuperficial y el aporte por el flujo base. En la Figura 39 se presenta un esquema del funcionamiento del modelo de tanques, así como la asociación física que tiene cada una de las etapas del modelo.

Tanque 1: Almacenamiento Capilar en el Suelo: Antes del tanque 1, el modelo deriva la precipitación  $X_1$  en el nodo  $D_1$ . Parte del agua va a los conductos inferiores, y parte se almacena en el tanque. El primer tanque representa el

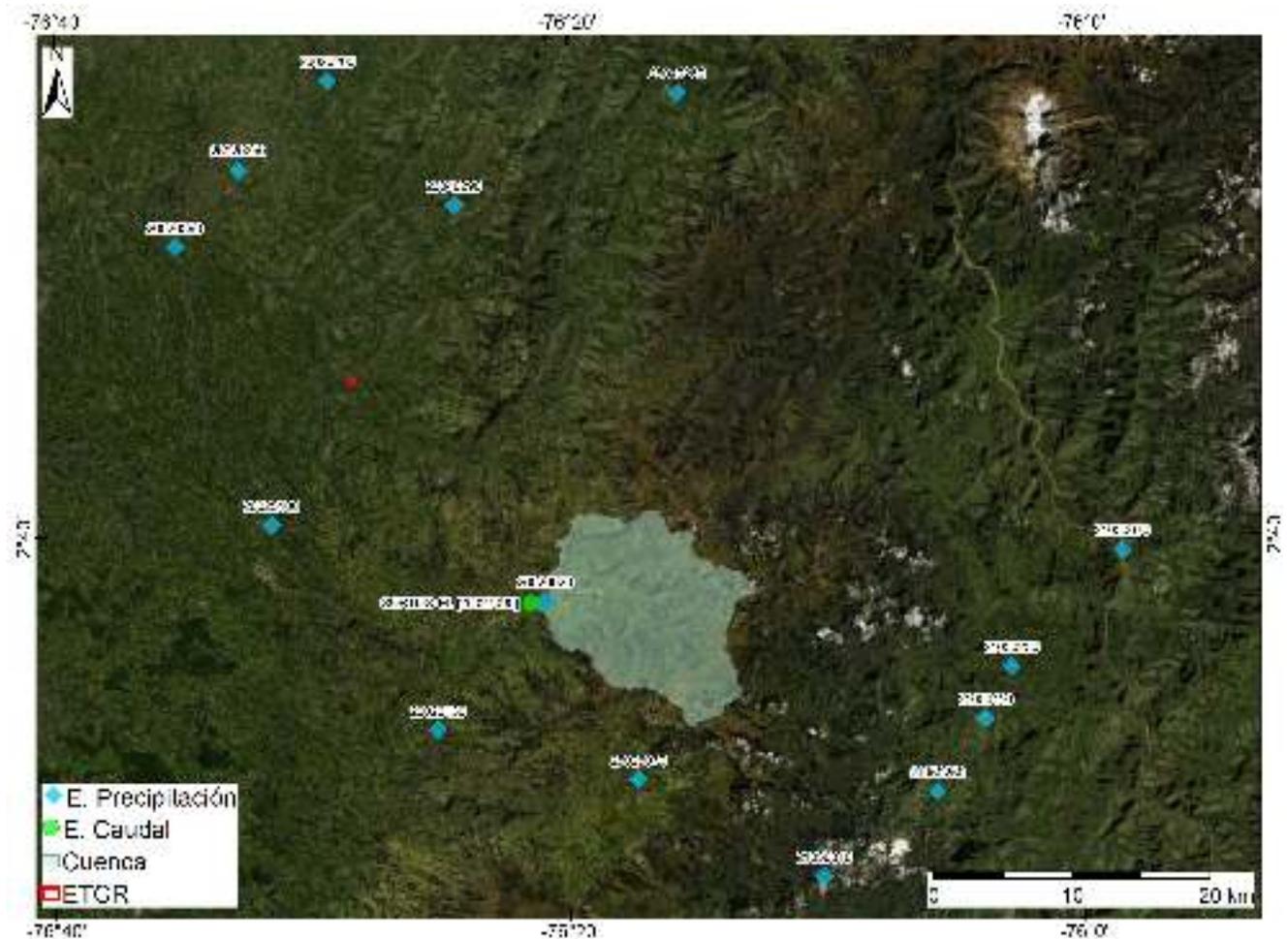


Figura 38: Cuenca e información hidroclimática empleada para la calibración del modelo

agua que transita por la cuenca y que solo sale por evapotranspiración, por lo que no hace parte de la escorrentía. En ella se ve representada el agua que es almacena en el suelo por capilaridad, a la detención de agua en los charcos y a la interceptación. La capacidad máxima de almacenamiento del tanque  $Hu$  está relacionada con la capacidad del suelo y de la cobertura de la superficie para almacenar agua. La capacidad de cobertura de la superficie para almacenar el agua está estrechamente relacionada con la cobertura vegetal de la cuenca.

Tanque 2. Almacenamiento de Flujo Superficial: El tanque 2 del modelo representa el agua que puede infiltrarse a niveles inferiores del suelo o la que se transforma en escorrentía directa. La cantidad de agua que es almacenada en el segundo tanque ( $H2$ ) depende de la capacidad del suelo para dejar pasar agua a su interior, representado a través de la conductividad hidráulica, que está en función del tipo y estructura del suelo, y que puede ser relacionada con la cobertura vegetal y los usos generales que tenga el suelo. La cantidad de

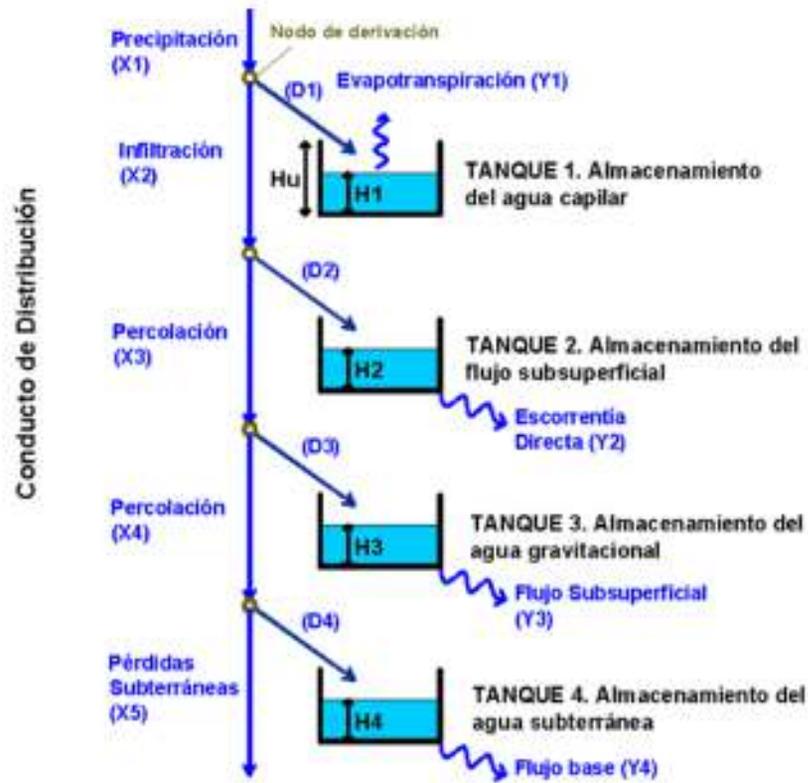


Figura 39: Esquema de funcionamiento del modelo

agua que entra al tanque es la que resulta luego de la derivación del excedente del almacenamiento capilar ( $X_2$  - infiltración), y la que sale es la escorrentía directa ( $Y_2$ ) a través de la cuenca.

Tanque 3. Almacenamiento de agua gravitacional en la capa superior del suelo: El tanque 3 representa el agua almacenada en la capa superior del suelo, que se convertirá posteriormente en el flujo subsuperficial ( $Y_3$ ). La cantidad de agua que entra a este tanque es la resultante de derivación en el nodo  $D_3$ , la cual se asocia a la cantidad de agua que se filtra por percolación ( $X_3$ ). Esta capacidad de percolación es representativa del tipo de subsuelo y de su estructura, lo que está altamente relacionado con las características geológicas de las capas inferiores del suelo. A su vez, la capacidad de percolación también está relacionada con aspectos geomorfológicos como el relieve.

Tanque 4. Almacenamiento subterráneo: El tanque  $T_4$  se consideraría como el almacenamiento de agua dentro del acuífero, en donde se almacena el agua gravitacional antes de salir como flujo base ( $Y_4$ ). El agua que es derivada al tanque 4 también se filtra como percolación a través de las capas inferiores del suelo.

La información de precipitación que requiere como entrada el modelo de tanques es de resolución diaria, por lo que el resultado del modelo será una serie de caudales medios diarios. Este caudal será calculado para cada paso de tiempo como la suma de la escorrentía directa ( $Y2$ ), el flujo subsuperficial ( $Y3$ ) y el flujo base ( $Y4$ ).

La correcta aplicación del modelo requiere de un proceso de calibración, en el cual se seleccionan los valores adecuados de algunos parámetros de entrada. Para la calibración y validación del modelo se ha escogido la estación de IDEAM 26027090, que envuelve la zona de estudio, se ubica sobre el río Piendamó y cuenta con más de 40 años de registro de caudales. A la estación seleccionada se le realiza el trazado de su cuenca aferente, con el objeto de estimar los caudales a través del modelo y compararlos con el registro de la estación. Por envolver la zona de estudio se asume que la cuenca del río Piendamó es hidrológicamente similar a la microcuenca abastecedora del antiguo ETCR Los Monos, logrando de esta manera cierta representatividad de los parámetros a escala regional. La calibración se realiza en el período temporal comprendido entre 1968 y 2013 (45 años de registros diarios aproximadamente).

El criterio para seleccionar el grupo de parámetros que mejor se ajusta a los caudales observados se basó en la comparación visual de las series, en el cálculo del criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe (Nash, Eamonn, y Sutcliffe, 1970), en el error entre el caudal medio a largo plazo simulado y observado (“error del balance”), y en la estimación del error medio cuadrático RMSE. Adicionalmente, se verificó el comportamiento de la curva de duración de caudales. Las siguientes expresiones refieren al criterio de eficiencia de Nash (3.6), al balance (3.7) y al RMSE (3.8):

$$NASH(Q) = \left( 1 - \frac{\sum (Q(t)_{obs} - Q(t)_{sim})^2}{\sum (\bar{Q}_{obs} - Q(t)_{obs})^2} \right) \quad (3.6)$$

$$Balance[\%] = \frac{\bar{Q}_{sim} - \bar{Q}_{obs}}{\bar{Q}_{obs}} \cdot 100 \quad (3.7)$$

$$RMSE[m^3/s] = \sqrt{\frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{N}} \quad (3.8)$$

Con  $Q(t)_{obs}$  como el caudal observado, en función del tiempo  $t$ ,  $Q(t)_{sim}$  es el caudal simulado en el tiempo  $t$ ,  $\bar{Q}_{obs}$  es el promedio de los caudales observados,  $\bar{Q}_{sim}$  es el promedio de los caudales simulados, y  $N$  es el número de datos.

El criterio de eficiencia de Nash es un indicador de qué tan similares son la serie simulada y la serie observada, y éste puede tomar valores en el rango  $(-\infty, 1]$ , donde 1 indica un ajuste perfecto entre las series. En términos generales, un valor positivo es satisfactorio, pues indica que la serie simulada tiene un ajuste más allá del promedio, siendo que mientras el número de Nash sea más cercano a 1, mejor será el ajuste a caudales extremos.

Por otro lado, el error del balance es un comparativo de qué tanto se ajustan los valores medios, y el error medio cuadrático es un indicador de la magnitud de los errores entre ambas series.

Uno de los principales insumos de entrada para el modelo lluvia-escorrentía es la información de las estaciones de precipitación que se encuentran dentro de la cuenca y que poseen información suficiente. El modelo requiere que se defina la proporción del área de influencia de cada una de las estaciones de precipitación, por lo que se construyeron polígonos de Thiessen para determinar el aporte ponderado de cada estación a la cuenca sobre la que se realiza la calibración y posterior validación. Una vez validado el modelo, a través de estos mismos polígonos se determina el aporte ponderado de cada estación sobre las cuencas.

En la Tabla 12 se presenta un resumen con los parámetros obtenidos de la calibración del modelo lluvia -escorrentía, mientras que en la Figura se muestra un gráfico comparativo de la serie de registros diarios observados con la serie sintética generada a partir del modelo. En la Figura 40 se muestra la curva de duración de caudales (CDC) observada y estimada, la Figura 41 presenta la serie de caudales observados contra los estimados. En general los resultados del modelo son satisfactorios. En la Figura 42 se presenta la serie sintética estimada para la microcuenca abastecedora. Finalmente, la curva de duración de caudales correspondiente a la serie sintética estimada para la microcuenca abastecedora se presenta a continuación en la Figura 43

#### **3.4.4.2. Cálculo de caudal ambiental**

Para conocer la oferta hídrica de cada fuente, y determinar los riesgos asociados a esta es necesario conocer el caudal ambiental, el cual se define como el volumen de agua necesario, desde aspectos de calidad, cantidad, duración y estacionalidad, para el sostenimiento de ecosistemas acuáticos y sistemas productivos que dependen de estos (IDEAM y MinAmbiente, 2015). Para el cálculo de este caudal se proponen las metodologías definidas en la Resolución 865 del año 2004 las cuales se relacionan a continuación:

Tabla 12: Parámetros calibrados para el modelo de tanques

Parámetros	Valor	Mínimo Sugerido	Máximo Sugerido
Almacenamiento Máximo Capilar	236,83	20	600
Conductividad Capa Sup (mm/día)	50,32	1	100
Conductividad Capa Inf (mm/día)	4,49	0,01	10
Perdidas Subterráneas (mm)	0,25	0	10
Tiempo de Residencia Flujo Superficial (días)	10	1	10
Tiempo de Residencia Flujo Subsuperficial (días)	7,27	1	10
Tiempo de Residencia Flujo Base (días)	200	50	200
<b>Condiciones Iniciales (mm)</b>			
Almacenamiento Capilar	209,27	0	216
Almacenamiento Agua Superficial	0	0	10
Almacenamiento Gravitacional Z Sup	0	0	30
Almacenamiento Gravitacional Z Inf (acuífero)	147,63	0	2000

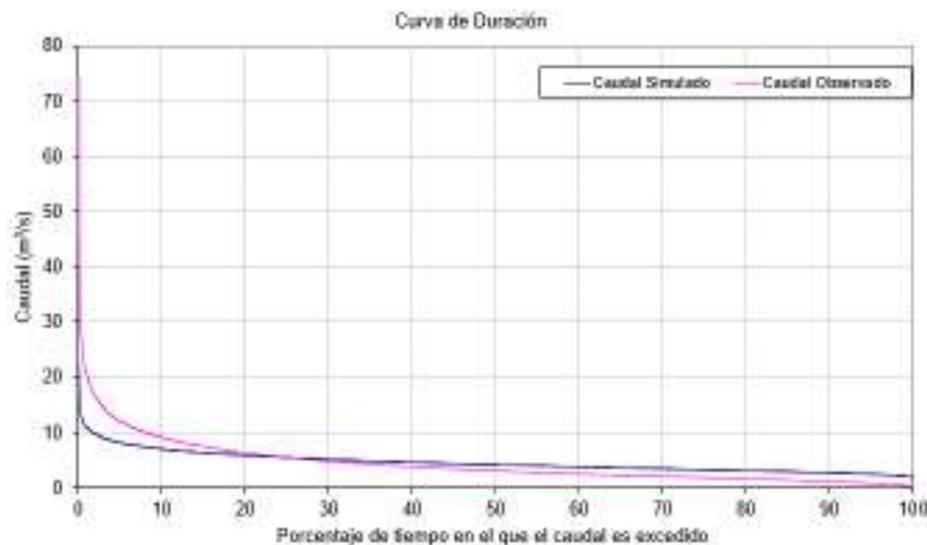


Figura 40: CDC entre la serie estimada y la observada

- (Método 1) Mínimo histórico: a partir de curvas de duración de caudales medios diarios, propone como caudal mínimo ecológico el caudal promedio multianual que permanece el 97,5 % del tiempo.
- (Método 2) Porcentaje de descuento: el IDEAM ha adoptado como caudal mínimo ecológico un valor aproximado del 25 % del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente en estudio.
- (Método 3) Reducción por caudal ambiental: el caudal ecológico en esta aproximación corresponde al 25 % del caudal medio multianual en condiciones de oferta media.

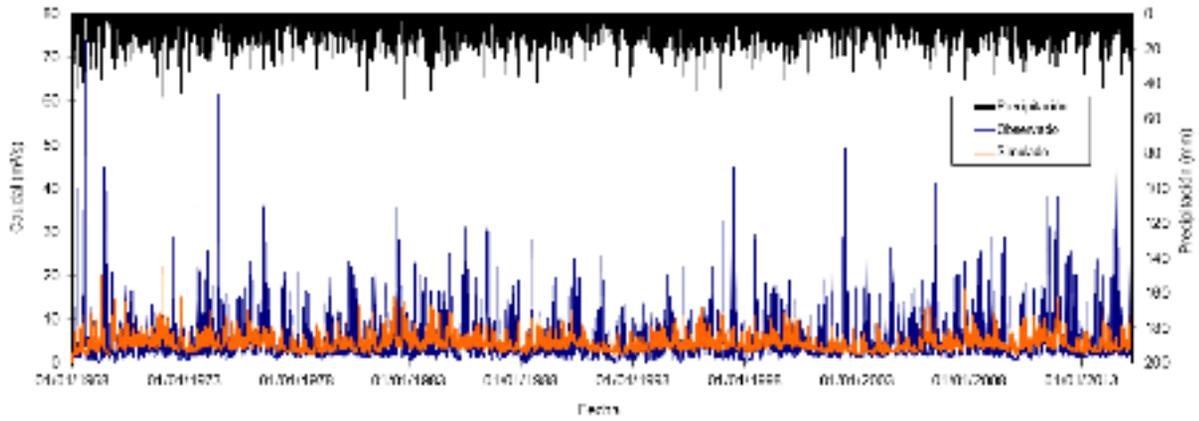


Figura 41: Serie de caudal estimada y observada

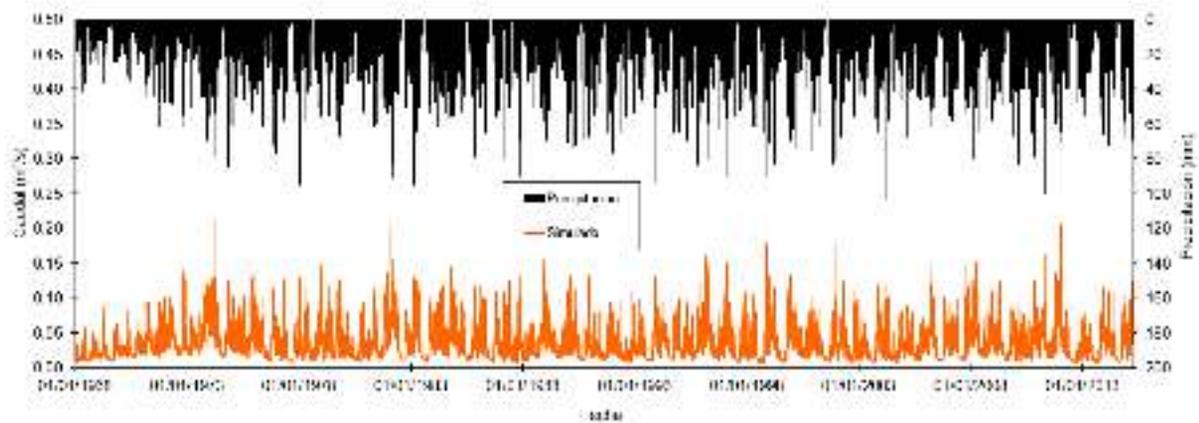


Figura 42: Serie de caudal sintética microcuenca abastecedora

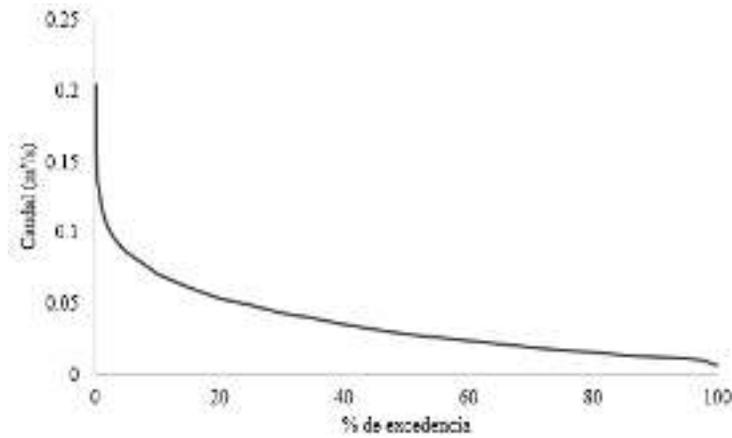


Figura 43: Curva de duración de caudales - microcuenca abastecedora

A continuación, en la Tabla 13 se presenta el cálculo del caudal ambiental según cada una de las metodologías y para la microcuenca abastecedora del antiguo ETCR.

Tabla 13: Caudal ambiental microcuenca abastecedora

M1 (l/s)	M2 (l/s)	M3 (l/s)	Qeco (l/s)
9,60	4,67	9,42	9,60

### 3.4.4.3. Disponibilidad hídrica

procede entonces a calcular la oferta hídrica para año hidrológico medio y año hidrológico seco. A partir de los resultados obtenidos del modelo lluvia-escorrentía, se calcula la oferta hídrica mensual y media multianual anual, para las condiciones de año hidrológico medio. La oferta hídrica se define en Colombia como “el volumen de agua disponible para satisfacer la demanda generada por las actividades sociales y económicas del hombre” (Resolución 865 de 2004). El Estudio Nacional del Agua 2010 define la oferta hídrica como el volumen de “agua continental que escurre por la superficie e integra los sistemas de drenaje superficial”. A su vez, afirma que la oferta se calcula a partir de la escorrentía superficial y está asociada directamente con los aportes de las áreas de las cuencas lo cual se ve representado en el caudal. El año hidrológico seco: son los caudales mínimos mensuales de las series de caudales medios, los cuales se identifican con el año típico seco (incluye períodos de los eventos El Niño y La Niña). Se presenta el ciclo anual para la microcuenca abastecedora en la Figura 44. En la Tabla 14 se presenta el cálculo de la oferta hídrica para la microcuenca. abastecedora.

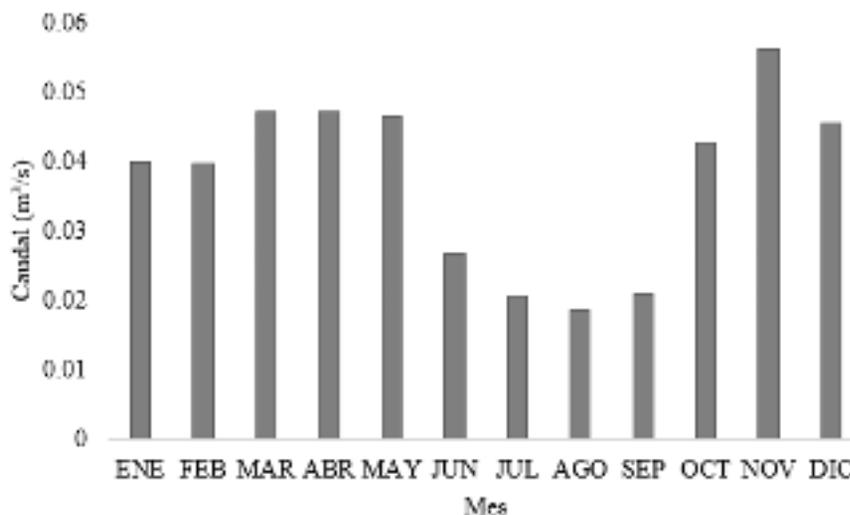


Figura 44: Ciclo anual de caudales en año medio para microcuenca abastecedora

Tabla 14: Disponibilidad hídrica año seco y año medio para la microcuenca

<b>Q Año seco (l/s)</b>	<b>Q Año medio (l/s)</b>	<b>Q eco (l/s)</b>	<b>Disponibilidad Año seco (l/s)</b>	<b>Disponibilidad Año medio (l/s)</b>
16.4	37.7	9.6	6.8	28.1

### 3.5. Caracterización y calidad de agua a tratar

Para el diseño de las plantas de tratamiento de aguas se debe tener una caracterización de las aguas a tratar, con esta se establece el tren de tratamiento necesario debido a los compuestos que se puedan encontrar en las aguas afluentes. Para el diseño de los sistemas de tratamiento de agua potable y aguas residuales se toman características típicas de composiciones de parámetros encontrados en las aguas a tratar según literatura consultada.

#### 3.5.1. Calidad de agua para consumo humano

Para llevar a cabo el diseño de potabilización de agua se tiene en cuenta una serie de normativas de referencia, las cuales establecen las condiciones físicas, rangos de interés, parámetros y buenas prácticas de ingeniería de diseño que se deben cumplir para procesos unitarios que conformarán el sistema de tratamiento.

Se toman caracterizaciones típicas de las aguas crudas de fuentes de captación (ver Tabla 15), en las cuales se varía su composición de parámetros según la polución de la fuente. Se asume una fuente regular a deficiente como parámetro de entrada para el diseño del sistema de tratamiento de agua potable, esto con el fin de considerar posibles vertimientos o afectaciones a la fuente debido a intervención antrópica, o pérdida de calidad de las aguas durante temporadas de lluvia.

Tabla 15: Caracterización de agua cruda según el grado de polución de la fuente (de Desarrollo Económico, 2000).

<b>Parámetros</b>	<b>Fuente aceptable</b>	<b>Fuente regular</b>	<b>Fuente deficiente</b>	<b>Fuente muy deficiente</b>
DBO 5 días:				

Tabla 15 continúa de la página anterior

Promedio mensual mg/L	1.5	1.5 - 2.5	2.5 - 4	>4
Máximo diario mg/L	1 - 3	3 - 4	4 - 6	>6
Coliformes totales (NMP/100 mL):				
Promedio mensual	0 - 50	50 - 500	500 - 5000	>5000
Oxígeno disuelto mg/L	>=4	>=4	>=4	<4
PH promedio	6.0 - 8.5	5.0 - 9.0	3.8 - 10.5	
Turbiedad (UNT)	<2	2 - 40	40 - 150	>= 150
Color verdadero (UPC)	<10	10 -20	20 - 40	>= 40
Gusto y olor	Inofensivo	Inofensivo	Inofensivo	Inaceptable
Cloruros (mg/L - Cl)	<50	50 - 150	150 - 200	300
Fluoruros (mg/L - F)	<1.2	<1.2	<1.2	>1.7

Anexo al informe se presenta el estudio de parámetros de calidad de agua de la fuente de captación, donde se evidencia que se presenta una calidad aceptable, sin embargo se presume una calidad de regular a deficiente por las condiciones posibles mencionadas anteriormente.

### 3.5.2. Calidad de vertimiento para aguas residuales

Para el diseño del sistema de tratamiento de las aguas residuales se evalúan las características de cumplimiento de normatividad, distribución y posicionamiento de la PTAR sobre la topografía, población y zona de afectación del proyecto, así como las idiosincrasias de la población aferente a este y sus usos del agua.

De igual manera se escoge como caracterización típica de aguas residuales una composición media de los parámetros especificados en la Tabla 16, esto debido a las características de la población, al uso de agua en la zona de actuación en donde no se evidencian aportes diferentes a aguas residuales domésticas ni aportes considerables de carga orgánica en la red de alcantarillado.

Tabla 16: Composición típica agua residual doméstica (Metcalf y cols., 1979).

Parámetro	Fuerte	Media	Débil
Sólidos Totales (mg/l)	1200	720	350
Sólidos Disueltos (mg/l)	850	500	250
Sólidos Disueltos Volátiles (mg/l)	325	200	105
Sólidos en Suspensión (mg/l)	350	220	100
Sólidos Sedimentables (ml/L)	20	10	5
$DBO_5$ (mg/l)	400	220	100
Carbono Orgánico Total (mg/l)	290	160	80
DQO (mg/l)	1000	500	250
Nitrógeno Total (mg/l)	85	40	20
Nitrógeno Orgánico (mg/l)	35	15	8
Nitrógeno Amoniacal (mg/l)	50	25	12
Fósforo (mg/l)	15	8	4
Fósforo Orgánico (mg/l)	5	3	1
Fósforo Inorgánico (mg/l)	10	5	3
Cloruros (mg/l)	100	50	30
Alcalinidad ( $mgCaCO_3/l$ )	200	100	50
Grasas (mg/l)	150	100	50

### 3.6. Tratamiento de aguas crudas

Para el tratamiento de las aguas crudas provenientes de una fuente de captación superficial o subterránea existen diversos tipos de tratamientos, los cuales se basan en la composición de los parámetros que se obtengan en la caracterización de dicha agua de captación, donde cada tipo de tratamiento busca remover estos parámetros y cumplir con las especificaciones planteadas en normatividad vigente.

Partiendo de lo anterior los procesos determinantes en la escogencia de alternativas para el tratamiento de las aguas crudas se centran en la remoción de sólidos y en la desinfección de las aguas para el cumplir con los requerimientos de consumo humano. El sistema de tratamiento de agua potable se establece según una evaluación mediante matriz de selección de alternativas, donde para las características del proyecto se evalúa la opción viable a implementar en la

zona de actuación.

### **3.7. Tratamiento de aguas residuales**

Para remediación de las aguas servidas, actualmente existen diversos tipos de tratamientos, los cuales son denominados como preliminares o primarios, secundarios y terciarios o avanzados, con el objetivo de remover los contaminantes, mediante procesos físicos, biológicos y fisicoquímicos.

De acuerdo a la naturaleza y composición de las aguas residuales municipales, los procesos de depuración del agua más usados por su sostenibilidad y simplicidad son los físicos y biológicos, debido a que teóricamente cumplen con las remociones requeridas para los principales contaminantes. Teniendo en cuenta la magnitud de agua a tratar diariamente no es muy usual en el país el reúso del agua por lo que tratamientos terciarios o avanzados son utilizados normalmente en tratamiento de aguas no domesticas de caudales relativamente pequeños comparado con las aguas producidas por un municipio del orden mayor a cincuenta mil habitantes.

Partiendo de la anterior premisa los procesos determinantes en la selección de alternativas o tecnologías se centran en el tratamiento secundario, principalmente en la oxidación biológica del cual es válido mencionar que están divididos en tres grupos de tipo aerobio, anaerobios y anóxicos, los cuales se diferencian por la presencia o ausencia del oxígeno durante los procesos de oxidación, propiciando diferentes ambientes microbiales con funciones especializadas de degradación de materia orgánica, generación de biomasa y otros productos, la eficiencia de los procesos es mejorada con la implementación de dos o tres en un solo sistema, con relación directamente proporcional al consumo energético.

El sistema de tratamiento para la remediación de las aguas residuales se escoge mediante un análisis de alternativas, tomando en cuenta criterios de peso para los requerimientos especiales de cada proyecto y escogiendo el tren de tratamiento más aceptable para la comunidad a intervenir.

#### **3.7.1. Proceso aerobio**

Proceso de oxidación de carbono y materia orgánica mediante presencia de oxígeno libre, este es usado para procesos de catabolismo, anabolismo y autóli-

sis, para la formación de productos como  $NH_3$ , agua,  $CO_2$  y biomasa. (Romero Rojas, 2004). Dentro del tratamiento aerobio con crecimiento adherido o suspendido se encuentran:

- Lodos activados en todas sus combinaciones.
- Lagunas aireadas.
- Filtros percoladores.
- Biodiscos.
- Torres biológicas y otros.

### 3.7.2. Proceso anaerobio

Proceso de fermentación donde la descomposición u oxidación de la materia o compuestos orgánicos se lleva a cabo mediante la ausencia de oxígeno libre, el proceso es poco menos eficiente en la producción de energía que el aerobio por lo que la producción de biomasa se ve limitada, produciendo básicamente  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  y  $H_2S$ .

Algunos tratamientos anaerobios de crecimiento adherido o suspendido son:

- Lagunas anaerobias.
- Reactores de flujo ascensional (UASB, PAMLA, IMHOFF).
- Filtros anaerobios y otros.

### 3.7.3. Proceso anóxico

El proceso de fermentación de nitrato, donde se reduce los iones hasta nitritos en ausencia de oxígeno libre, donde son los nitratos los aceptores finales de electrones (Romero Rojas, 2004), estos procesos, aunque pueden remover DBO al agua son usados en combinación con los procesos aerobios y/o anaerobios para la remoción de nutrientes, en etapas de nitrificación-desnitrificación, combinado con tratamiento terciario para reúso, o mejoramiento del agua tratada para procesos agroindustriales.

# Referencias

- de Desarrollo Economico, M. (2000). *Resolucion 1096 de 2000, 17 de noviembre, por la cual se adopta el reglamento tecnico para el sector de agua potable y saneamiento basico-ras*. Autor.
- del Carmen Santana, M., Tovar, J. F. B., y Sotomayor, C. A. C. (2015). Rango de consumo básico. *CRA, nov*.
- IDEAM, y MinAmbiente. (2015). Análisis integrado. En *Estudio nacional del agua 2014* (cap. 9).
- Metcalf, L., Eddy, H. P., y Tchobanoglous, G. (1979). *Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse* (Vol. 4). McGraw-Hill New York.
- Ministerio de Vivienda, C. y. T. (2018). *Resolucion 0844 de 2018, 08 de noviembre, por la cual se establecen los requisitos técnicos para los proyectos de agua y saneamiento básico de zonas rurales que se adelantan bajo los esquemas diferenciales definidos en el capítulo 1, del título 7, de la parte 3, del libro 2 del decreto 1077 de 2015*. Autor.
- Mulvaney, T. J. (1851). Mulvaney, T. J. (1851). On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rainfall and flood discharges in a given catchment. *Proceedings of the institution of Civil Engineers of Ireland, 4*, 19–31.
- Nash, Eamonn, J., y Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology, 10*(3), 282–290.
- Romero Rojas, J. A. (2004). Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño. *Bogotá, CO, Escuela Colombiana de Ingenieros*.
- Vélez, J. I. (2001). *Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas* (Tesis Doctoral no publicada).

## Capítulo 4

# Metodología de Alternativas

### Introducción

En el documento se precisa la metodología para seleccionar las alternativas de tratamiento, con base, en la publicación “Selección de Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Guía de Apoyo para Ciudades Pequeñas y Medianas” (Noyola, Morgan-Sagastume, y Güereca, 2013), la cual es adaptada para encontrar la alternativa recomendada para PTAR y PTAP, esta se describe en el numeral 4.4.

Teniendo como información de partida la calidad de agua residual típica doméstica para PTAR y una fuente de calidad fisicoquímica y microbiológica asumida según RAS 2000 para PTAP, así como las proyecciones de usuarios y censos suministrados por el contratante, se enuncian de acuerdo con la literatura las posibles alternativas o tecnologías de tratamiento. Para las características de los antiguos ETCS se proponen los siguientes trenes de tratamiento:

PTAR (Tratamiento Secundario)

- Lodos activados + Clarificación secundaria.
- Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) +FAFA+ Clarificación secundaria.
- Sistema Lagunar (Laguna anaerobia + Laguna de maduración).

PTAP

- Coagulación, floculación, sedimentación, filtración, desinfección.
- Filtración directa, desinfección

- Tanque de agua cruda, micro y ultrafiltración, desinfección

Estas alternativas son ampliamente usados y recomendados para las características de poblaciones rurales y caudales relativamente bajos. En la metodología se valoran aspectos y variables determinantes como consumos energéticos, áreas, entre otras, con ponderaciones determinadas por experiencias conocidas y fundamentadas en la normativa vigente y la literatura especializada.

#### 4.1. Tipos de tratamiento de aguas

Actualmente, existen diversos tratamientos con el objetivo de remover los contaminantes de las aguas, los componentes orgánicos e inorgánicos que aportan dicha contaminación se encuentran de formas disueltas y/o en suspensión, todo ellos con la finalidad de dar cumplimiento a la normatividad vigente, el balance de masas de los sistemas de tratamiento es como muestra la Figura 45.

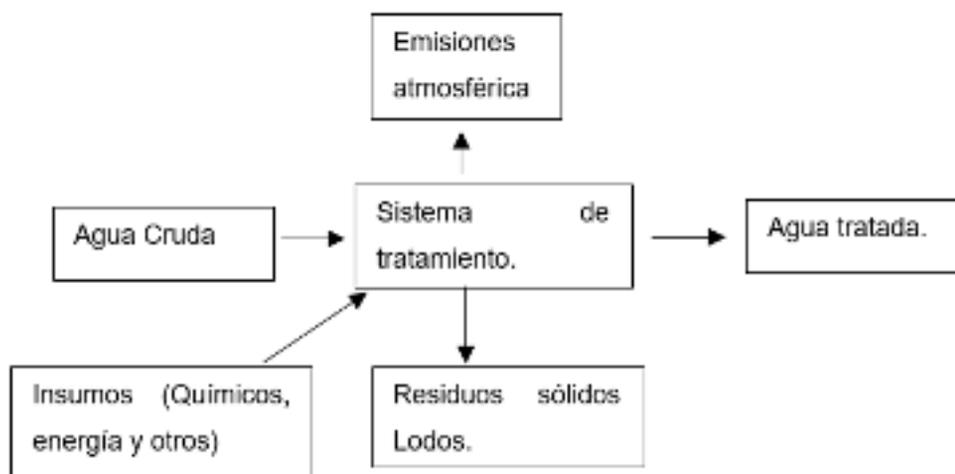


Figura 45: Balance de masas.

Dependiendo del tipo de tecnología a emplear los tratamientos de aguas se enmarcan dentro tres tipos de procesos unitarios, los cuales se pueden complementar entre ellos en un orden lógico para alcanzar o aumentar las eficiencias de remoción, por la naturaleza del estado de la materia y por la alteración e interacción con microorganismos los procesos son:

- Físicos
- Biológicos

- Fisicoquímicos

Un componente no menos importante en el balance de masas y energía es el tratamiento de los residuos sólidos, los cuales dependiendo de la humedad pueden ser removidos como lodos, para ello se combinan procesos unitarios de origen biológico y fisicoquímicos.

Existe variedad en los procesos unitarios, dependiendo de la configuración y su orden lógico se definen como pretratamientos o tratamiento primario, secundarios y terciarios, siendo estos últimos con mayor complejidad en el tratamiento debido a los insumos y recursos necesarios.

## 4.2. Alternativas de la PTAP

Para el diseño de los sistemas de tratamiento de los antigu ETCR, es importante identificar las características fisicoquímicas y microbiológicas de la fuente, así como también otros aspectos fundamentales que, al momento de la sostenibilidad y operación de los sistemas, pueden llegar a ser determinantes. Entre ellos se encuentran aspectos socioeconómicos, culturales, demográficos, entre otros.

### 4.2.1. Alternativa 1. (Coagulación+ floculación+ sedimentación+ filtración, desinfección)

Asumiendo que la calidad del agua de la fuente presenta variabilidad en épocas de invierno y/o por afectaciones de descargas aguas arriba, se selecciona un tren de tratamiento para la alternativa uno que considere los procesos convencionales de clarificación en sistemas PTAP, el agua proveniente de las estructuras de captación y desarenado llegan a la planta mediante la aducción y entran a gravedad a un floculador-sedimentador, con la posibilidad de dosificación de productos químicos (Coagulante, floculante, Ajuste de pH) antes de la unidad, posteriormente garantizando alimentación hidráulica a gravedad entra al proceso de filtración rápida en arenas para recibir la dosificación del desinfectante y llegar al almacenamiento.

Esta alternativa requiere energía para la dosificación ajustada de químicos y para el bombeo de agua para el lavado del filtro. Por los volúmenes de lodos producidos debido a la presencia de sólidos suspendidos totales en las aguas de

lavados, estas se deben espesar para luego llevar a deshidratación. El tren se describe en la Figura 46.

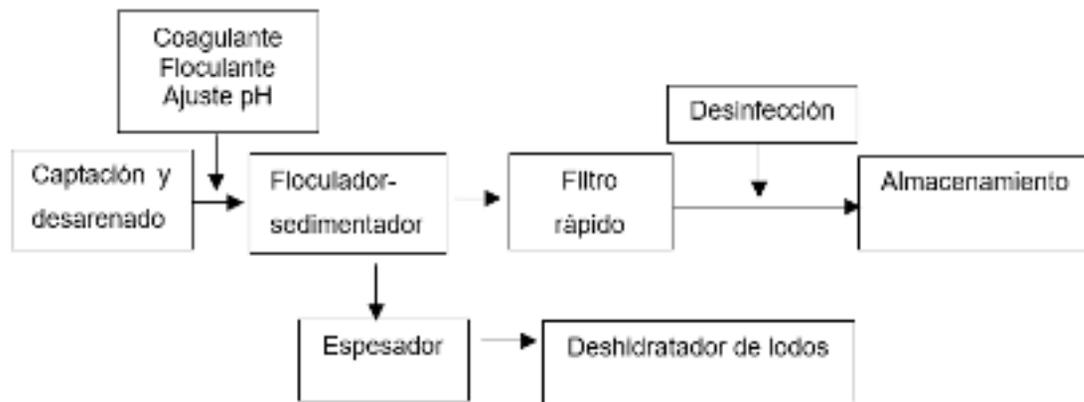


Figura 46: Tren tratamiento PTAP Alternativa 1.

#### 4.2.2. Alternativa 2 (Filtración directa + desinfección)

Asumiendo que el agua de la fuente se mantiene estable como fuente regular o pueda ser aceptable según Tabla B.2.1 del RAS2000 (de Desarrollo Económico, 2000), se propone un tren de tratamiento con filtración directa rápida en unidad a presión, alimentado desde el desarenador con desinfección previa al almacenamiento, esta alternativa corresponde al sistema simplificado (Figura 47), requiriendo en todo momento conservar una alimentación con calidad estable. Para el tratamiento de lodos solo se dispone de un deshidratador tipo eras de secado, con capacidad para el volumen del lavado, la dosificación y el lavado puede realizarse con electro-bombas, para mejorar la precisión de dosis del desinfectante y la optimización del consumo de agua durante la limpieza del filtro.

#### 4.2.3. Alternativa 3. (Tanque de agua cruda + micro y ultra-filtración + desinfección)

Otra alternativa de tratar aguas con calidad regular y deficiente consiste en la utilización de la tecnología de membranas, para disminuir área de unidades convencionales, sin embargo se requiere que las aguas provenientes del desarenado lleguen a un tanque de carga o amortiguación para ser impulsadas mediante electro-bomba y poder romper la presión requerida por las membranas hasta

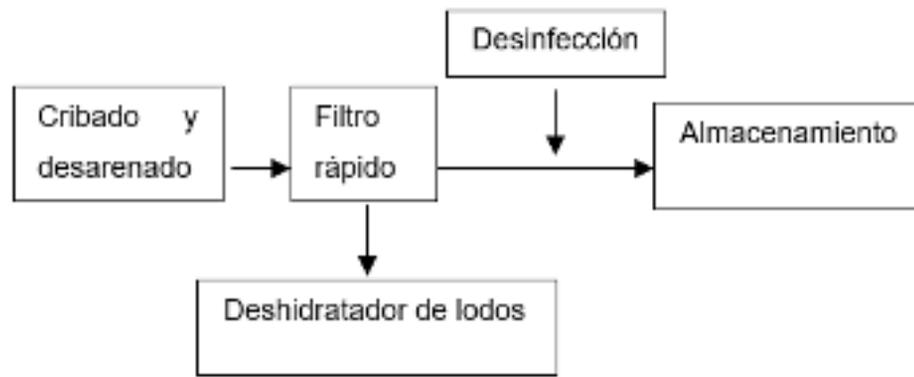


Figura 47: Tren tratamiento PTAP Alternativa 2.

llegar al tanque de almacenamiento previa dosis de desinfección. Esta alternativa puede que requiera de dosificación de químicos para el tratamiento y para limpieza de membranas, el tratamiento de lodos se realiza mediante deshidratación en eras de secado. El tren propuesto se muestra en la Figura 48.

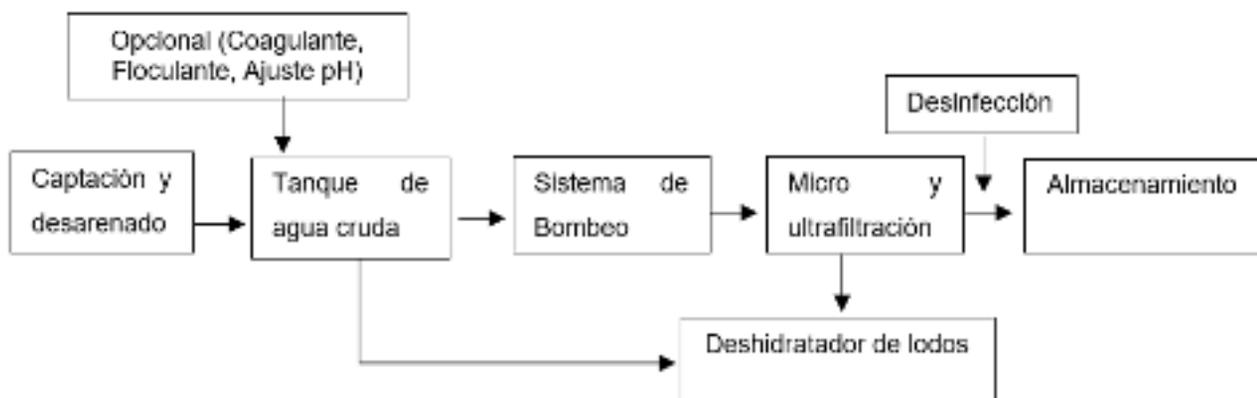


Figura 48: Tren tratamiento PTAP Alternativa 3.

### 4.3. Alternativas de la PTAR

Para el diseño de los sistemas de tratamiento de los antiguos ETCR, es importante identificar las características de las aguas residuales servidas, así como otros aspectos fundamentales que, al momento de la sostenibilidad y operación de los sistemas, pueden llegar a ser determinantes. Entre ellos se encuentran aspectos socioeconómicos, culturales, demográficos, entre otros.

### 4.3.1. Alternativa 1. (Lodos Activados + Sedimentación)

En general, podemos decir que los lodos activados están dirigidos a transformar sustrato orgánico soluble o insoluble, en forma coloidal o suspendida, en sólidos biológicos floculentos, que pueden ser asentados y de este modo separados del agua que contaminan, por medio de los procesos convencionales de sedimentación. En otras palabras, se pretende transformar la “contaminación” de las aguas, presente en forma de DBO soluble e insoluble en biomasa, que contendrá gran parte de la DBO original del sustrato orgánico, pero que puede ser separada del agua residual (AR) por sedimentación y filtración. Estos sólidos separados deberán luego ser concentrados y estabilizados para someterlos a una posterior disposición final, ya en forma de desechos sólidos (Romero Rojas, 2004).

El AR debe someterse primero a un tratamiento preliminar para separar los sólidos más gruesos con rejillas y desarenadores. Luego se somete a la sedimentación primaria donde se remueven los sólidos asentables, que en las aguas residuales domesticas; ARD, pueden conformar hasta el 40 % de la DBO total.

A continuación, viene el tratamiento secundario propiamente dicho, conformado por el reactor biológico y el separador o sedimentador secundario, con el sistema de retorno para concentrar los lodos, Figura 49.

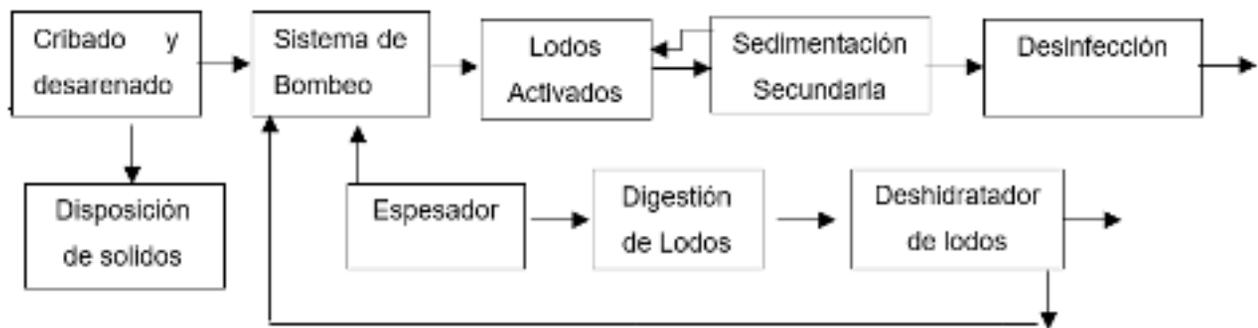


Figura 49: Tren tratamiento PTAR Alternativa 1.

### 4.3.2. Alternativa 2 (UASB + FAFA+ Sedimentación)

Los UASB son los reactores anaerobios más comúnmente usados. Se componen esencialmente de un tanque con una distribución uniforme del agua residual por el fondo del tanque a través de una serie de boquillas, buscando que el agua a tratar se ponga en contacto con el manto de lodo anaerobio de tipo flocúleno o granular. La degradación anaerobia ocurre en el lodo y como consecuencia de ello se produce biogás, que es el encargado de generar la mezcla para lograr un buen contacto entre el agua residual y la biomasa, excluyéndose la presencia de mezcla mecánica.

El flujo combinado del agua residual y el biogás, puede expandir algunos de los sólidos del lodo hacia el vertedero de salida. Un separador de tres fases está situado en la parte superior del reactor para separar biogás, agua y lodo.

El biogás es captado a través de una campana y conducido hacia la parte externa del reactor para su posterior manejo o disposición (quema de biogás). Algunos de los sólidos son arrastrados con el agua hasta el sedimentador situado encima de la campana de gas, donde sedimentan. El agua residual tratada rebosa sobre un canal situado en la parte superior del reactor que permite descargar el efluente. Durante el período de arranque del proceso, se permite que las partículas más voluminosas sean lavadas con el efluente, generando así una selección de biomasa, para buscar mantener internamente solo las que presenten las mejores características de sedimentabilidad (Romero Rojas, 2004).

El sistema se complementa con un proceso de filtro anaerobio de flujo ascendente FAFA, para darle un pulimiento al proceso biológico, seguido de una sedimentación para mejorar la calidad del efluente, el tren de tratamiento se representa en la Figura 50.

### 4.3.3. Alternativa 3. (Laguna facultativa y/o anaerobia)

Las lagunas de estabilización, LE, conforman el sistema más sencillo de tratamiento de agua residual con lecho suspendido. A menudo se les llama también lagunas de oxidación. Su forma más simple consiste en estanques artificialmente construidos, en los cuales se desarrolla una población microbológica compuesta por bacterias, algas y protozoos que conviven en forma simbiótica.

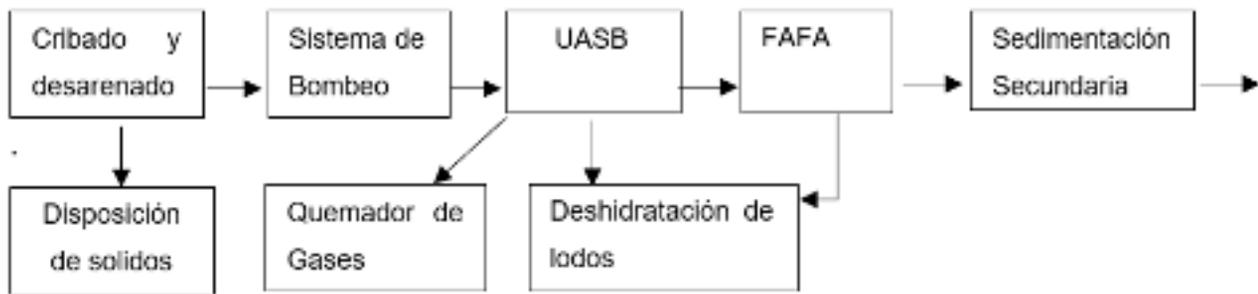


Figura 50: Tren tratamiento PTAR Alternativa 2.

La población microbiológica se desarrolla espontáneamente hasta alcanzar el punto de equilibrio de las diversas especies con la carga orgánica. La función de las bacterias es eliminar el sustrato orgánico, mientras la función de las algas es producir el oxígeno requerido por aquellas para la respiración. Como las algas operan fotosintéticamente, la producción de oxígeno es variable durante el día, dependiendo de la iluminación, y nula durante la noche. Por otra parte, la producción del  $CO_2$  por las bacterias y aun por la respiración algal, ocasiona variación en la acidez del estanque cuando las algas no lo consumen en la fotosíntesis. De este modo, el pH tiende a ser bajo durante las tardes, dándole a la laguna un color verdoso. Un pH en caída se conoce por el color amarillento de la laguna. En las lagunas intervienen diversos parámetros como el pH, el OD, la temperatura, la acción del viento, la luminosidad, etc. Estos factores deben ser analizados antes de construir la laguna, pues la operación solo puede controlar el flujo de AR de una u otra laguna, de modo que el funcionamiento será fundamentalmente definido por las condiciones ambientales, difícilmente controlables, el tren de la alternativa se muestra en la Figura 51.

#### 4.4. Matriz de decisión

La técnica de evaluación propuesta en esta metodología, ayuda a seleccionar el proyecto más adecuado desde el punto de vista técnico con base en una matriz de decisión. Esta correlaciona los distintos aspectos que pueden ser evaluados en un proceso de tratamiento de agua, bajo determinadas circunstancias de aplicación mediante la asignación de calificaciones a rubros según los criterios del o de los evaluadores, basados en la definición de los siguientes aspectos:

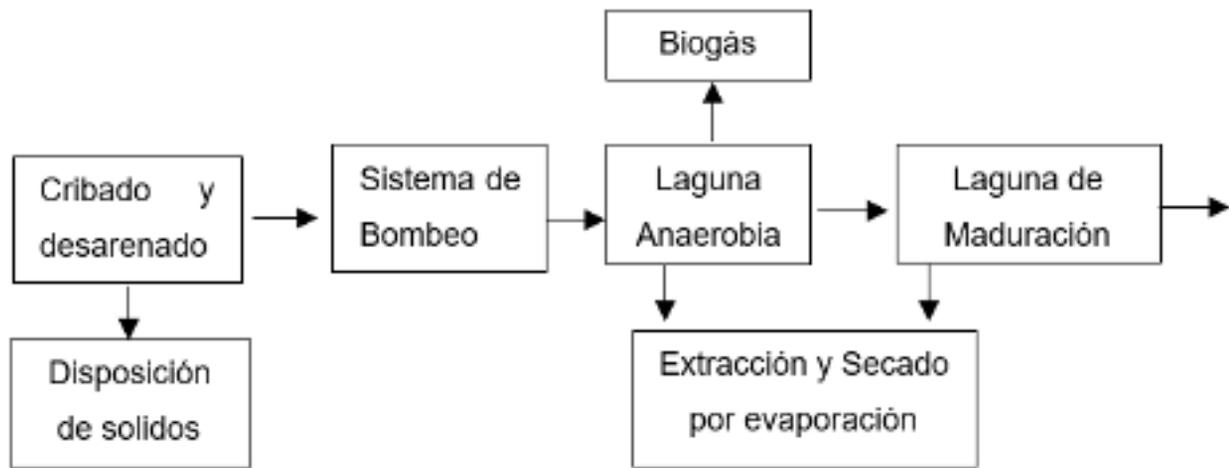


Figura 51: Tren tratamiento PTAR Alternativa 3.

#### 4.4.1. Aplicabilidad del proceso

- Por las características del proyecto se desea que el proceso seleccionado pueda operar en el intervalo de flujo dado, que sea tolerante a variaciones hidráulicas y que pueda tratar con eficacia el agua residual influente.
- Se requiere que la alternativa de tratamiento de agua potable tenga las unidades y procesos requeridos para el cumplimiento de calidad apta para consumo humano, que la variación de caudales o calidad de agua cruda no afecten el tratamiento.

#### 4.4.2. Generación de Residuos

- Uno de los aspectos más importantes a considerar en la selección de un sistema de tratamiento es la generación de residuos. Por ello se ha decidido favorecer aquel proceso que genere la menor cantidad de residuos y el que genere una mejor calidad de lodo para su disposición como mejorador de suelos.
- De acuerdo con la necesidad de procesos adicionales y las dosis de químicos, se produce una mayor cantidad de lodos.

#### **4.4.3. Aceptación por parte de la Comunidad**

- La comunidad es consciente de la necesidad de recolección y tratamiento de las aguas residuales para mejorar la calidad de vida de sus habitantes dando cumplimiento a la normativa vigente y siendo amigables con el medio ambiente.
- La comunidad se puede ver prevenida por tecnologías complejas de operar y que represente aumento de tarifa por costos operativos.

#### **4.4.4. Flexibilidad de la tecnología para adecuación a cumplimiento de cambio normativo**

- Se desea evaluar cuál de los sistemas tiene mejor adaptación a procesos complementarios para cumplimiento de norma de acuerdo con futuros ajustes (Remoción de nutrientes principalmente).
- Se debe evaluar un sistema o tecnología capaz de asumir la incorporación de procesos adicionales ante una disminución de la calidad del agua cruda por desarrollo antrópico, así como en épocas de lluvias.

#### **4.4.5. Vida útil**

Se desea que la planta de tratamiento posea una vida útil lo más larga posible pues será difícil contar con recursos para renovar la planta de tratamiento en mediano plazo y que las reparaciones sean de menor cuantía.

#### **4.4.6. Requerimientos de Área**

Este rubro fue limitado por la disponibilidad del terreno, dependiendo de las tecnologías de tratamiento, la adquisición de bienes se convierte en algunos casos como un factor determinante.

#### **4.4.7. Costos**

Inversión inicial, aunque normalmente los recursos se encuentran disponibles para construir la planta de tratamiento y resolver la problemática de saneamiento, es importante considerar aquella tecnología que sea eficaz y eficiente en el tratamiento del agua, es decir que haga lo que tenga que hacer al menor costo posible para obtener un ahorro de recursos que podrían ser destinados a otras acciones.

#### 4.4.8. Diseño y Construcción

En la selección de tecnologías es importante contar con el sustento teórico del diseño, se recomienda emplear criterios de diseño adecuados a las condiciones del antiguo ETCR, que existan casos de éxito a nivel local o nacional y que su implementación minimice la complejidad de construcción.

#### 4.4.9. Operación

Se desea que la operación sea simple, flexible y confiable, con capacitación de baja complejidad. Con disponibilidad de adquisición de repuestos y servicios cerca de la población.

- Operación y mantenimiento. Este es uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta para seleccionar adecuadamente una tecnología. El municipio y la población desean un sistema con bajos costos de operación y mantenimiento, debido a que dichos costos son directamente proporcionales a la tarifa por usuario.
- Requerimiento de reactivos. Esto puede representar una implicación fuerte al considerar que algunos reactivos presentan mayor dificultad de consecución y trasladarlos hasta las poblaciones rurales aumenta los costos.
- Requerimiento energético. Este aspecto se considera de gran importancia porque incide en la implementación de equipos electromecánicos los cuales representan además de costos mayores riesgo a la operación.
- Gastos administrativos y de personal. Se favorecerá el sistema que tenga menores requerimientos de personal especializado.
- Requerimiento de refacciones y material de mantenimiento. En el mismo sentido, el sistema con menores necesidades en estos insumos deberá ser favorecido.

#### 4.4.10. Entorno e Impacto al Medio Ambiente

La necesidad de la planta de tratamiento es una necesidad que minimiza los impactos ambientales del entorno, sin embargo, se debe elegir una tecnología que minimice los riesgos a los eventuales impactos ambientales negativos que se puedan generar ante una mala operación del sistema, así como los impactos por ruido o de aspecto visual.

## 4.5. Operación matriz de decisión

Como es posible observar en la presentación de los rubros considerados, hay conceptos agrupados bajo un rubro y conceptos independientes. El hecho de designar un concepto como independiente o incorporarlo dentro de un rubro depende de la importancia que se le dé a cada concepto bajo el marco de un proyecto determinado. La presente estructuración de los conceptos en la matriz es una propuesta que se piensa puede abarcar un mayor número de proyectos.

La matriz consta de 6 columnas iniciales (A, B, C, D, E, F) y 32 renglones útiles.

- En la columna A se enumeran los ítems.
- En la columna B se presentan los valores de ponderación para los diversos rubros a evaluar del proyecto y la suma de los valores ponderados fijados en la columna B debe ser 100. Los valores de la columna B deben ser fijados mediante acuerdo entre las personas que participarán en el llenado, considerando la importancia que tiene cada rubro dentro de las condiciones específicas de cada proyecto. Eventualmente, a alguno de ellos se le puede asignar un valor de cero, cuando el rubro correspondiente no implique diferencia entre las tecnologías evaluadas o bien sea un asunto plenamente controlado. Estos valores de ponderación deberán permanecer constantes para cada caso, independientemente de cuál sistema de tratamiento de aguas se esté evaluando.
- En la columna C se identifican estos rubros.
- En la columna D se evalúa cada rubro y subrubro de la columna C al otorgar un valor de cero cuando el aspecto evaluado no aplique, 1 cuando el proceso cumpla con el aspecto en forma deficiente, 2 cuando cumpla de forma aceptable, 3 cuando cumpla con el aspecto en forma adecuada, 4 cuando cumpla de forma buena y 5 cuando el proceso cumpla con el aspecto evaluado en forma muy buena o excelentemente.
- En la columna E, la calificación asignada a cada rubro (columna D) se divide entre la calificación máxima que pueden obtener (es decir 5) excepto para las casillas 9.4 E, 10.8 E, 11.6 E, pues esto ya se realizó a partir de las calificaciones de los subrubros, de acuerdo con las instrucciones en la misma matriz.

- En la columna F se multiplica el valor de cada renglón de la columna E por el valor ponderado de la columna B y finalmente se suman todos los renglones de la columna F para obtener la calificación global (casilla 11 F) del proceso evaluado bajo las condiciones ponderadas en la columna B.
- La columna D a la columna F aplica para una alternativa de diseño, estas se replican con las mismas características dependiendo del número de alternativas a evaluar.

El proceso que obtenga la mayor calificación será el seleccionado, para el comparativo entre alternativas se copia el formato en las siguientes columnas.

#### 4.5.1. Ponderación de Rubros

La importancia o peso de cada aspecto o rubro considerado se muestra a continuación en la Tabla 17, las valoraciones corresponden a las características de los proyectos a diseñar, y son otorgadas con base en los criterios de los profesionales que, en esta fase de la matriz, son relevantes también apoyados en el estado del arte y experiencias en casos de éxitos.

Tabla 17: Ponderación de factores según criterios

<b>Factor evaluado</b>	<b>Ponderación PTAR</b>	<b>Ponderación PTAP</b>
Aplicabilidad del proceso (Variaciones de Caudal)	2	2
Aplicabilidad del proceso (Eficiencias de remoción carga orgánica)	3	2
Generación de residuos	5	2
Aceptación por parte de la comunidad	5	2
Flexibilidad de la tecnología para adecuación a cumplimiento cambio normativo	15	30
Vida útil	5	5
Requerimiento de área	10	7
Costo	10	10
Diseño y construcción	5	5
Operación	25	30
Entorno e impacto ambiental	15	5

### 4.5.2. Características cuantificables de Alternativas

Para la cuantificación y diferenciación entre alternativas se utilizan a criterio del diseñador, aspectos y características relevantes que puedan arrojar un cálculo cuantificable propiciando una diferenciación de modo objetivo entre los parámetros de mayor ponderación; cabe resaltar que algunos valores son tentativos (como costos, dosis y otros) que no corresponden al valor total final de la alternativa, solo marcan un diferenciador entre parámetros o criterios de diseño propios de dicha alternativa. Estas características cuantificables se pueden observar en la Tabla 18 para la PTAP y en la Tabla 19 para la PTAR.

Tabla 18: Cálculos alternativas PTAP

Parámetro	Alternativas		
	Cálculos		
Q Diseño (l/s)	4.4		
Horas de operación	22		
Tiempo de Floculación (min)	20		
Alternativas	Coagulación, floculación, sedimentación, filtración	Filtración directa	Tanque de agua cruda, Micro y Ultrafiltración
Alimentación PTAP	Gravedad	Gravedad	Bombeo
Volumen Tanque de agua cruda ( $m^3$ )	N/A	N/A	15.8
Volumen Floculador sedimentador ( $m^3$ )	5.3	N/A	N/A
Dosis coagulante (mg/l)	5.0	0.0	0.0
Costo coagulante (\$/g)	1.5	1.5	1.5
Dosis floculante (mg/l)	0.1	0.0	0.0
Costo floculante (\$/g)	15.0	15.0	15.0
Dosis desinfectante (mg/l)	3.0	3.0	3.0
Costo desinfectante (\$/g)	1.0	1.0	1.0
Total (Kg/día)	2.81	1.05	1.05
Costo promedio químicos (\$/día)	49,092.1	18,295.2	18,295.2

Tabla 18 continúa de la página anterior

Área Reactor ( $m^2$ )	3.0	1.0	2.0
Potencia de equipos requeridos (KW)	4.6	4.5	13.3
Valor KW/hora	500.0	500.0	500.0
Consumo energético \$/día	50,050.0	48,950.0	145,750.0
Costos operativos \$/día	99,142.1	67,245.2	164,045.2
Costos de construcción <sup>1</sup>	2.0	1.0	3.0

Tabla 19: Cálculos alternativas PTAR

Parámetro	Alternativas		
Cálculos			
Q Diseño (l/s)	3.7		
DBO <sub>in</sub> (ppm)	220.0		
DQO <sub>in</sub> (ppm)	500.0		
SST <sub>in</sub> (ppm)	220.0		
Kg DBO/día	70		
Kg DQO/día	160		
Kg SST/día	70		
Alternativas	Lodos Activados	UASB+FAFA	Lagunas
TRH h	13.2	7.0	120.0
Volumen Total Reacción ( $m^3$ )	175.8	93.2	1,598.4
Profundidad reactor (m)	3.0	6.0	1.0
Área Reactor ( $m^2$ )	58.6	15.5	1,598.4
Eficiencia de Remoción DQO	64 %	64 %	64 %
Eficiencia de Remoción DBO	59 %	59 %	59 %
Lodos producidos tratamiento secundario Kg SS/día	18.5	11.25	28.1

<sup>1</sup>Los valores son calificaciones comparativas respecto a costos de las tecnologías, no representan los costos reales y son adimensionales. Estos se establecen a partir de criterio técnico y literatura especializada.

Tabla 19 continúa de la página anterior

Potencia de equipos requeridos (KW)	3.8	1.5	0.8
Valor KW/hora	500.0	500.0	500.0
Consumo energético \$/día	45,000.0	18,000.0	9,000.0
Costo \$/m <sup>3</sup> de reactor en PRFV/Geomembrana	850,000.0	850,000.0	350,000.0
Costos de construcción (\$)	149,450,400.0	79,254,000.0	559,440,000.0
Eficiencia Teórica RAS2000	95 %	90 %	90 %
Concentración DBO salida Teórica PTAR (ppm)	11.0	22.0	22.0

Para la lista de alternativas de tratamiento de PTAR y PTAP, se debe tener definida la calidad del agua a la entrada de los sistemas, así como la normativa de cumplimiento de salida, que para el presente diseño corresponde a calidad de agua residual domestica típica (ver Tabla 20.) como entrada y salida cumpliendo lineamientos de vertimientos (Art.8 Resolución 631 del 2015).

Tabla 20: Composición típica agua residual doméstica

Parámetro	Fuerte	Media	Débil
Sólidos Totales (mg/l)	1200	720	350
Sólidos Disueltos (mg/l)	850	500	250
Sólidos Disueltos Volátiles (mg/l)	325	200	105
Sólidos en Suspensión (mg/l)	350	220	100
Sólidos Sedimentables (ml/L)	20	10	5
<i>DBO</i> <sub>5</sub> (mg/l)	400	220	100
Carbono Orgánico Total (mg/l)	290	160	80
DQO (mg/l)	1000	500	250
Nitrógeno Total (mg/l)	85	40	20
Nitrógeno Orgánico (mg/l)	35	15	8
Nitrógeno Amoniacal (mg/l)	50	25	12
Fósforo (mg/l)	15	8	4
Fósforo Orgánico (mg/l)	5	3	1
Fósforo Inorgánico (mg/l)	10	5	3
Cloruros (mg/l)	100	50	30
Alcalinidad ( <i>mgCaCO</i> <sub>3</sub> /l)	200	100	50

Tabla 20 continúa de la página anterior

Grasas (mg/l)	150	100	50
---------------	-----	-----	----

Para PTAP, debido a las características rurales de ECTRS y a la intervención antrópica de las cuencas, se asume un rango de calidad de regular a deficiente de acuerdo con la estacionalidad del año, según la Tabla B.2.1 de calidad del agua del RAS 2000 Art. B.3.3.2.1. (Figura 52) se seleccionan posibles alternativas que den cumplimiento a la Resolución 2115 de 2017 de calidad de agua para consumo humano.

Parámetros	Análisis según		Nivel de calidad de acuerdo con el grado de polución			
	Norma técnica NTC	Standard Method ASTM	1. Fuente aceptable	2. Fuente regular	3. Fuente deficiente	4. Fuente muy deficiente
DBO <sub>5</sub> días	3630					
Promedio mensual mg/L			≤ 1.5	1.5 - 2.5	2.5 - 4	>4
Máximo diario mg/L			1 - 3	3 - 4	4 - 6	>6
Coliformes totales (NMP/100 mL)						
Promedio mensual		D-3870	0 - 50	50 - 500	500 - 5000	>5000
Oxígeno disuelto mg/L	4705	D-888	>=4	>=4	>=4	<4
pH promedio	3651	D 1293	8.0 - 8.5	5.0 - 9.0	3.8 - 10.5	
Turbiedad (UNT)	4707	D 1889	<2	2 - 40	40 - 150	>= 150
Color verdadero (UPC)			<10	10 - 20	20 - 40	>= 40
Gusto y olor		D 1292	Inofensivo	Inofensivo	Inofensivo	Inaceptable
Cloruros (mg/L - Cl)		D 512	< 50	50 - 150	150 - 200	300
Fluoruros (mg/L - F)		D 1179	<1.2	<1.2	<1.2	>1.7
<b>GRADO DE TRATAMIENTO</b>						
- Necesita un tratamiento convencional			NO	NO	Si, hay veces (ver requisitos para uso FLDE: literal C.7.4.3.3)	SI
- Necesita unos tratamientos específicos			NO	NO	NO	SI
- Procesos de tratamiento utilizados			(1) = Desinfección + Estabilización	(2) = Filtración Lenta o Filtración Directa + (1)	(3) = Pretratamiento + [Coagulación + Sedimentación + Filtración Rápida] o [Filtración Lenta Diversas Etapas] + (1)	(4) = (3) + Tratamientos específicos

Figura 52: Calidad de la fuente.

### 4.5.3. Calificaciones Matriz PTAP

A continuación se presentan la Tabla 21 en la cual se hace la calificación de alternativas para la PTAP de acuerdo a la metodología descrita en la sección 4.4.

Tabla 21: Calificaciones de PTAP

	ALTERNATIVAS:	ALT. 1	ALT. 2	ALT. 3
Factor evaluado	Comentarios del evaluador	Calif.	Calif.	Calif.
Aplicabilidad del proceso.	De acuerdo a la calidad del agua cruda las alternativas son viables para el tratamiento, algunas con mayor redundancia para cumplimiento.	5	3	4
Generación de residuos.	La tecnología que cuente con más unidades de proceso, puede ser más eficiente y presentar mayor remoción SST en forma de lodos, adicionalmente de los residuos de productos químicos.	4	3	5
Aceptación por parte de la comunidad.	La comunidad se puede ver prevenida por tecnologías complejas de operar y que represente aumento de tarifa por costos operativos	3	5	2
Flexibilidad de la tecnología para adecuación ante desmejoramiento de la calidad de la fuente	La alternativa 1, presenta todos los procesos convencionales de tratamiento, la cual posee mayor rango de operación ante variación de la calidad, que los procesos de filtración directa y filtración por membranas.	5	2	4
Vida útil equipos electromecánicos	La alternativa recomendada obviamente es la que tenga menor dependencia de equipos.	3	5	2

Requerimiento de área	La alternativa de filtración directa por tener menor cantidad de unidades de tratamiento presenta menor requerimiento de área.	1	5	1
Costo de inversión inicial	La alternativa 3, presenta mayor costo inicial por los equipos electromecánicos y por la tecnología de membranas.	3	5	2
Costo de operación y mantenimiento	La alternativa 2, cuenta con costos operativos menores por la simplicidad del tratamiento, luego la alternativa 3 presenta los costos de mayor impacto por los costos energéticos asociados a la tecnología.	5	5	2
Criterios de diseño.	Existe suficiente literatura y Colombia tiene dentro de la normativa vigente los criterios de diseño requeridos para las tres alternativas.	5	4	3
Tecnología ampliamente probada.	Debido a la magnitud de los sistemas y por estar enfocada a poblaciones rurales, la mayor calificación se otorga a los sistemas de menor complejidad en operación, así todas se hayan probado ampliamente en el país.	4	4	3
Complejidad de construcción y equipamiento.	La complejidad de la alternativa 3, es mayor debido a la tecnología y equipos requeridos, la filtración directa es la más simple.	3	4	2

<p>Flexibilidad de la operación.</p>	<p>Los procesos que implican sistemas modulares presentan mayor flexibilidad ante paros por mantenimientos o contingencias, por lo que la alternativa 3 por los costos de inversión pocas veces tiene dualidad en las unidades.</p>	<p>4</p>	<p>5</p>	<p>2</p>
<p>Confiabilidad del proceso.</p>	<p>Las alternativas 3 y 1 son las de mayor confiabilidad en orden decreciente, por los cantidad de procesos posibles y por la dependencia de productos químicos.</p>	<p>4</p>	<p>3</p>	<p>5</p>
<p>Complejidad de operación del proceso</p>	<p>Definitivamente las alternativas con mayor tecnología representada en equipos electromecánicos, aunque simplifican áreas y procesos unitarios requiere de mayor capacitación o conocimientos del personal operador así como actividades de mantenimiento.</p>	<p>4</p>	<p>5</p>	<p>3</p>
<p>Requerimiento de personal</p>	<p>Todos los sistemas requieren de personal para la operación, sin embargo la alternativa 3 requieren de una capacitación especializada de mayor profundidad que la 2 y la 1, todas requieren de preparación de químicos, pero la 1 presenta mayor cantidad de productos a dosificar.</p>	<p>4</p>	<p>5</p>	<p>3</p>

Requerimientos de análisis y controles	La alternativa 1 presenta mayor cantidad de controles debido a que cuenta con mayor número de productos a dosificar, este aspecto es más complejo que el seguimiento y control de la alternativa 3.	3	5	3
Disponibilidad de repuestos y centros de servicio	La simplicidad del sistema nuevamente se ve reflejada con mayor puntuación debido a la dependencia de equipos electromecánicos y material de las unidades de tratamiento.	3	4	2
Influencia de la temperatura.	La temperatura en procesos físicos y fisicoquímicos es de menor relevancia para alcanzar la calidad de agua potable.	3	3	3
Producción de ruido.	Por los equipos involucrados en la alternativa 3, hay mayor producción de ruido, aunque de mínimo impacto.	3	3	2
Contaminación visual.	Todos los sistemas pueden contar con un diseño arquitectónico agradable e integrado al entorno, sin embargo la planta con más unidades a la vista tiene un impacto mayor.	2	3	3
Producción de malos olores.	Los olores generados por el tratamiento de lodos, no es significativo.	3	3	3

Calidad del agua tratada	Todas las tecnologías alcanzan la calidad de cumplimiento de normativa sin embargo la alternativa 3, por la tecnología presenta mayor alcance de cumplimiento ante variación de la calidad del agua cruda.	4	3	5
--------------------------	--	---	---	---

#### 4.5.4. Calificaciones Matriz PTAR

A continuación se presentan la Tabla 22 en la cual se hace la calificación de alternativas para la PTAR de acuerdo a la metodología descrita en la sección 4.4.

Tabla 22: Calificaciones de PTAR

	ALTERNATIVAS:	L.A. + CLARIF.	UASB + FAFA + CLARIF.	SIST. LAGUNAR
Factor evaluado	Comentarios del evaluador	Calif.	Calif.	Calif.
Aplicabilidad del proceso.	Todos procesos biológicos de las alternativas de tratamiento han sido aplicados en el ámbito mundial, siendo los lodos activados los más aplicados.	4	3	3
Generación de residuos.	La generación de residuos para la tecnología UASB presenta menor producción que los lodos activados y las lagunas, sin embargo, estas ultimas son diseñadas con acumulación de largos periodos, lo que al momento de mantenimiento se convierte en un problema.	3	5	2

Aceptación por parte de la comunidad.	La aceptación de la comunidad está basada en el impacto por olores, generados principalmente en procesos anaerobios por la producción de $H_2S$ .	5	2	2
Flexibilidad de la tecnología para adecuación a cumplimiento cambio normativo	Los procesos aerobios se pueden adaptar o complementar fácilmente para alcanzar remociones no solo de materia orgánica sino también nutrientes, el complemento se puede alcanzar con procesos anóxicos.	4	3	2
Vida útil equipos electromecánicos	La alternativa recomendada obviamente es la que tenga menor dependencia de equipos, las lagunas por su TDH no requieren de equipos de bombeo para la alimentación.	2	4	5
Requerimiento de área	Los sistemas lagunares impactan considerablemente este aspecto debido a tiempos de detención de días, sin embargo, el UASB y los lodos pueden emplear TDH de 4 horas en adelante.	1	5	1
Costo de inversión inicial	Por la simplicidad del tratamiento del UASB se convierte en la tecnología de mayor puntuación, debido a los equipos requeridos por los lodos activados y al área de las lagunas.	3	5	1
Costo de operación y mantenimiento	Las lagunas requieren de bajo costo de mantenimiento respecto a los lodos activados, debido al equipamiento.	1	3	5

Criterios de diseño.	Existe suficiente literatura y Colombia tiene dentro de la normativa vigente los criterios de diseño requeridos para las tres alternativas.	4	4	4
Tecnología ampliamente probada.	Debido a la magnitud de los sistemas y por estar enfocada a poblaciones rurales, la mayor calificación se otorga a los sistemas de menor complejidad en operación, así todas se hayan probado ampliamente en el país.	3	4	4
Complejidad de construcción y equipamiento.	La construcción y el equipamiento del sistema de lodos activados y del sistema lagunar son más complejos que los UASB, el primero por el equipamiento y el segundo por la adecuación de los terrenos.	3	4	2
Flexibilidad de la operación.	Los procesos que implican sistemas modulares presentan mayor flexibilidad ante paros por mantenimientos o contingencias, por lo que el sistema lagunar por el área requerida pocas veces tiene dualidad en las unidades.	5	4	2

<p>Confiabilidad del proceso.</p>	<p>De acuerdo a la literatura el proceso aerobio de lodos activados presenta porcentajes de remoción mayor que el UASB y las lagunas, sin embargo, el proceso anaerobio UASB puede llegar alcanzar más rápidamente la estabilidad del proceso, si el riesgo que implica la aireación ante fallos energéticos.</p>	<p>3</p>	<p>3</p>	<p>4</p>
<p>Complejidad de operación del proceso</p>	<p>Definitivamente las alternativas con mayor tecnología representada en equipos electromecánicos, aunque simplifican áreas y procesos unitarios requiere de mayor capacitación o conocimientos del personal operador, así como actividades de mantenimiento.</p>	<p>2</p>	<p>4</p>	<p>5</p>
<p>Requerimiento de personal</p>	<p>Todos los sistemas requieren de personal para la operación, sin embargo, los lodos activados requieren de una capacitación especializada de mayor profundidad que la del UASB y las lagunas.</p>	<p>2</p>	<p>4</p>	<p>4</p>
<p>Requerimientos análisis y controles</p>	<p>El control de las operaciones rutinarias es más complejo para el sistema de lodos activados, que para el UASB y las lagunas</p>	<p>2</p>	<p>3</p>	<p>5</p>
<p>Disponibilidad de repuestos y centros de servicio</p>	<p>La simplicidad del sistema nuevamente se ve refleja con mayor puntuación debido a la dependencia de equipos electromecánicos y material de las unidades de tratamiento.</p>	<p>2</p>	<p>3</p>	<p>5</p>

Influencia de la temperatura.	La temperatura es un factor determinante en los procesos biológicos, siendo los procesos aerobios los de menor influencia ante cambios bruscos, los reactores UASB presentan dicha limitación a temperaturas bajas.	5	3	5
Producción de ruido.	Por los equipos involucrados en el sistema de lodos activados hay mayor producción de ruido, los sopladores requieren de cuartos o cámaras de insonorización.	1	4	5
Contaminación visual.	Todos los sistemas pueden contar con un diseño arquitectónico agradable e integrado al entorno, sin embargo, las tecnologías de Lodos activados y UASB tienen un impacto mayor que las lagunas.	2	3	5
Producción de malos olores.	En general los sistemas aerobios minimizan la producción de olores ofensivos, sin embargo, algunas estructuras preliminares o primarias pueden llegar a generar olores impactantes sobre todo por la generación de ácido sulfhídrico $H_2S$ , de los sistemas evaluados el MBR cuenta con cámara anóxica para la remoción de nutrientes lo que genera producción de dichos gases, debe contar con tratamiento de olores para cumplir con la norma.	3	2	2

Calidad del vertimiento	Todas las tecnologías alcanzan la calidad de cumplimiento de normativa sin embargo los lodos activados presentan mayor remoción teórica	5	3	3
-------------------------	---	---	---	---

#### 4.6. Matriz de decisión y calificaciones

La matriz de decisión de la PTAP y la PTAR se presentan anexas al informe de diseño con las respectivas calificaciones de los procesos evaluados y la escogencia de la alternativa óptima según dicha metodología de selección.

### 4.6.1. Matriz de decisión PTAP

TIPO DE TECNOLOGIA DE TRATAMIENTO			ALTERNATIVA 1 COAGULACION, FLOCULACION, SEDIMENTACION, FILTRACION, DESINFECCION			ALTERNATIVA 2 FILTRACION, DESINFECCION			ALTERNATIVA 3 TANQUE DE AGUA CRUDA + MICRO + ULTRA FILTRACION, DESINFECCION		
			CALIFICACION 0= no aplica 1= deficiente 2= regular 3= adecuado 4= bueno 5= muy bueno	DV6 (excepto en renglones 9.4, 10.8 y 11.6)	E*6	CALIFICACION 0= no aplica 1= deficiente 2= regular 3= adecuado 4= bueno 5= muy bueno	DV6 (excepto en renglones 9.4, 10.8 y 11.6)	E*6	CALIFICACION 0= no aplica 1= deficiente 2= regular 3= adecuado 4= bueno 5= muy bueno	DV6 (excepto en renglones 9.4, 10.8 y 11.6)	E*6
#	%	PROCESO EVALUADO: PTAP									
1	2	APLICABILIDAD DEL PROCESO (Variaciones de Caudal)	5.0	1.0	2.0	3.0	0.8	1.2	4.0	0.8	1.8
2	2	APLICABILIDAD DEL PROCESO (Eficiencias de clarificación)	5.0	1.0	2.0	3.0	0.8	1.2	5.0	1.0	2.0
3	2	GENERACION DE RESIDUOS	4.0	0.8	1.8	3.0	0.8	1.2	5.0	1.0	2.0
4	2	ACEPTACION POR PARTE DE LA COMUNIDAD	3.0	0.6	1.2	5.0	1.0	2.0	2.0	0.4	0.8
5	30	flexibilidad de la tecnología para adecuación ante desmejoramiento de la calidad de la fuente	5.0	1.0	30.0	2.0	0.4	12.0	4.0	0.8	2.4
6	5	VIDA UTIL	3.0	0.6	3.0	5.0	1.0	5.0	2.0	0.4	2.0
7	7	REQUERIMIENTO DE AREA	1.0	0.2	1.4	5.0	1.0	7.0	1.0	0.2	1.4
8	10	COSTO									
8.1		Inversión	2.8			6.0			1.7		
8.3		Sumar las casillas 8.1 y 8.2 y dividir el total entre 10. El resultado anotarlo en la casilla 8.3 E		0.5	5.0		1.0	10.0		0.3	3.3
9	5	DISEÑO Y CONSTRUCCION									
9.1		Criterios de diseño	5.0			4.0			3.0		
9.2		Tecnología ampliamente probada	4.0			4.0			3.0		
9.3		Complejidad en la construcción y equipamiento	3.0			4.0			2.0		
9.4		Sumar las casillas 9.1D, 9.2D, 9.3D y dividir el total entre 15. El resultado anotarlo en la casilla 9.4		0.8	4.0		0.8	4.0		0.5	2.7
10	30	OPERACION									
10.1		Flexibilidad de operación	4.0			5.0			2.0		
10.2		Confiablez del proceso	4.0			3.0			5.0		
10.3		Complejidad de operación del proceso	4.0			5.0			3.0		
10.4		Requerimiento de personal	4.0			5.0			3.0		
10.6		Requerimientos análisis y controles	3.0			5.0			3.0		
10.6		Disponibilidad de repuestos y centros de servicio	3.0			4.0			2.0		
10.7		Sostenibilidad en Operación y mantenimiento	4.0			5.0			1.7		
10.8		Sumar las casillas 10.1D, 10.2D, 10.3D, 10.4D, 10.6D, 10.6D y 10.7D y dividir el total entre 35. El resultado anotarlo en la casilla 10.8E		0.8	28.0		0.9	27.4		0.6	16.0
11	5	ENTORNO									
11.1		Influencia de la temperatura	3.0			3.0			3.0		
11.2		Producción de ruido	3.0			3.0			2.0		
11.3		Contaminación visual	2.0			3.0			3.0		
11.4		Producción de malos olores	3.0			3.0			3.0		
11.5		Calidad del agua tratada	4.0			3.0			5.0		
11.6		Sumar las casillas 11.1D, 11.2D, 11.3D, 11.4D, 11.5D y dividir el total entre 25. El resultado anotarlo en la casilla 11.6E		0.6	3.0		0.6	3.0		0.6	3.2
12	100	SUMAR LOS VALORES DE LA COLUMNA E Y ANOTAR EL RESULTADO EN LA CASILLA 12E			76.2			74.0			50.0

Figura 53: Matriz de decisión PTAP.

### 4.6.2. Matriz de decisión PTAR

TIPO DE TRATAMIENTO		Lodos Activados+ Clarificación			UASB+FAFA+ Clarificación			Sistema Lagunar			
EFICIENCIAS A GARANTIZAR (%DBD)		59%									
EFICIENCIAS A GARANTIZAR (%DQO)		64%									
#	%	PROCESO EVALUADO: PTAR	CALIFICACIÓN 0= no aplica 1= deficiente 2= regular 3= adecuado 4= bueno 5= muy bueno	D/S (excepto en renglones 9.4, 10.8 y 11.6)	E/B	CALIFICACIÓN 0= no aplica 1= deficiente 2= regular 3= adecuado 4= bueno 5= muy bueno	D/S (excepto en renglones 9.4, 10.8 y 11.6)	E/B	CALIFICACIÓN 0= no aplica 1= deficiente 2= regular 3= adecuado 4= bueno 5= muy bueno	D/S (excepto en renglones 9.4, 10.8 y 11.6)	E/B
1	2	APLICABILIDAD DEL PROCESO (Variaciones de Caudal)	4.0	0.8	1.6	3.0	0.6	1.2	3.0	0.6	1.2
2	3	APLICABILIDAD DEL PROCESO (Eficiencias de remoción carga orgánica)	4.0	0.8	2.4	3.0	0.6	1.8	2.0	0.4	1.2
3	5	GENERACIÓN DE RESIDUOS	3.0	0.6	3.0	3.0	1.0	5.0	2.0	0.4	2.0
4	5	ACEPTACIÓN POR PARTE DE LA COMUNIDAD	5.0	1.0	5.0	2.0	0.4	2.0	2.0	0.4	2
5	15	flexibilidad de la tecnología para adecuación a cumplimiento cambio normativo	4.0	0.8	12.0	3.0	0.6	9.0	2.0	0.4	6
6	5	VIDA ÚTIL	2.0	0.4	2.0	4.0	0.8	4.0	5.0	1.0	5
7	10	REQUERIMIENTO DE ÁREA	1.0	0.2	2.0	5.0	1.0	10.0	1.0	0.2	2.0
8	10	COSTO									
8.1		inversión	2.7			5.0			0.7		
8.3		Sumar las casillas 8.1 y 8.2 y dividir el total entre 10. El resultado anotarlo en la casilla 8.3 E		0.5	5.3		1.0	10.0		0.1	1.4
9	5	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN									
9.1		Criterios de diseño	4.0			4.0			4.0		
9.2		Tecnología ampliamente probada	3.0			4.0			4.0		
9.3		Complejidad en la construcción y equipamiento	3.0			4.0			2.0		
9.4		Sumar las casillas 9.1D, 9.2D, 9.3D y dividir el total entre 15. El resultado anotarlo en la casilla 9.4		0.7	3.3		0.8	4.0		0.7	3.3
10	25	OPERACIÓN									
10.1		Flexibilidad de operación	5.0			4.0			2.0		
10.2		Confiablez del proceso	3.0			3.0			4.0		
10.3		Complejidad de operación del proceso	2.0			4.0			5.0		
10.4		Requerimiento de personal	2.0			4.0			4.0		
10.5		Requerimientos análisis y controles	2.0			3.0			5.0		
10.6		Disponibilidad de repuestos y centros de servicio	2.0			3.0			5.0		
10.7		Sostenibilidad en Operación y mantenimiento	1.0			2.5			5.0		
10.8		Sumar las casillas 10.1D, 10.2D, 10.3D, 10.4D, 10.5D, 10.6D y 10.7D y dividir el total entre 35. El resultado anotarlo en la casilla 10.8E		0.5	12.1		0.7	16.8		0.9	21.4
11	15	ENTORNO									
11.1		Influencia de la temperatura	5.0			3.0			5.0		
11.2		Producción de ruido	1.0			4.0			5.0		
11.3		Contaminación visual	2.0			3.0			5.0		
11.4		Producción de malos olores	3.0			2.0			2.0		
11.5		Calidad del vertimiento	5.0			2.5			2.5		
11.6		Sumar las casillas 11.1D, 11.2D, 11.3D, 11.4D, 11.5D y dividir el total entre 25. El resultado anotarlo en la casilla 11.6E		0.6	9.6		0.6	8.7		0.8	11.7
12	100	SUMAR LOS VALORES DE LA COLUMNA E Y ANOTAR EL RESULTADO EN LA CASILLA 12E			58.4			72.5			57.3

Figura 54: Matriz de decisión PTAR.

#### 4.7. Resultados y conclusiones

De acuerdo con las calificaciones y criterios de los profesionales evaluadores en las Tablas 21 y 22, se computó el modelo de la matriz para las alternativas de PTAR y PTAP, dando como resultado que las alternativas recomendadas para los sistemas de tratamiento de los antiguos ETCR son la alternativa 2 de PTAR y la alternativa 1, para PTAP, obteniendo puntajes de 72,5 y 76,2 respectivamente.

Para el tratamiento de aguas residuales se recomienda el sistema UASB + FAFA + Sedimentación o Clarificación secundaria, aunque obtuvo una ligera ventaja sobre la alternativa de lodos activados, el componente energético es determinante, por otra parte, el sistema lagunar obtuvo la menor puntuación debido a que el componente área también es fundamental en la selección.

En el sistema PTAP, la posibilidad de contar con los tratamientos convencionales prima sobre la alternativa de filtración directa debido a que por el desarrollo de las cuencas así sean rurales se presenta cierta variabilidad en la calidad del agua que limita la alternativa o tecnología. La alternativa de membranas aunque muy eficiente y confiable, presenta mayor grado de incertidumbre por la dependencia de equipos electromecánicos que inciden en costos operativos además de la capacitación especializada y la disponibilidad de repuestos en las zonas rurales.

# Referencias

- de Desarrollo Economico, M. (2000). *Resolucion 1096 de 2000, 17 de noviembre, por la cual se adopta el reglamento tecnico para el sector de agua potable y saneamiento basico-ras*. Autor.
- Noyola, A., Morgan-Sagastume, J., y Güereca, L. (2013). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales: Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas. *México: Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Romero Rojas, J. A. (2004). Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño. *Bogotá, CO, Escuela Colombiana de Ingenieros*.

## Capítulo 5

# Captación y Aducción de agua cruda para tratamiento

### Introducción

En el presente capítulo se establece la captación de agua cruda, el tratamiento primario mediante desarenador y la aducción o conducción de la agua cruda captada hasta la ubicación de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) del antiguo antiguo Espacio Territorial de Capacitación y Reincorporación ETCR, con base en las características presentadas en el capítulo de viabilidad sanitaria, partiendo de los parámetros de caudal de diseño de la PTAP.

Como variables principales se encuentra el caudal de diseño a suplir del sistema de tratamiento de agua potable el cual corresponde a **4,4 l/s**. Así como las condiciones topográficas para la ubicación de la captación, el sistema de desarenador y el trazado de la conducción hasta la PTAP.

Se procede a continuación a describir el diseño de los sistemas de captación, tratamiento primario de desarenador y aducción de agua cruda.

### 5.1. Captación

La captación del agua se realizará por medio de una bocatoma lateral sumergida, que se diseñó teniendo en cuenta la información obtenida en el estudio hidrológico de la fuente de captación y el caudal de diseño.

Una bocatoma lateral sumergida es una estructura empleada en fuentes con inestabilidad y variaciones considerables de caudal y cambio de curso frecuente,

además tiene la capacidad de prefiltrar el agua antes de conducirla a la línea de aducción del sistema. Esto se logra mediante la utilización de un lecho granular, el cual filtra el agua y la conduce a un sistema de recolección por tuberías perforadas en el fondo del cauce.

La bocatoma lateral sumergida es proyectada sobre la cota 2256,0 m.s.n.m., la estructura estará compuesta por los siguientes componentes:

- **Empaque de Grava:** Es una capa de grava que se coloca sobre la tubería de recolección con el fin de protegerla, además al ubicar estas capas de manera que la grava de mayor tamaño quede en el exterior del empaque y la más fina en la cercanía de la tubería hace que el empaque funcione como un filtro, evitando que la tubería se obstruya por arrastre de sólidos.
- **Sistema de Recolección:** Es una tubería perforada que se coloca dentro de un canal o simplemente dentro de un solado. Se deben usar tuberías con un diámetro mínimo de 4", los orificios deben ir en doble línea a 30° a lado y lado del punto de contacto de la tubería con el fondo.
- La concentración de agujeros se recomienda que sea aproximadamente 48 agujeros de 1/4" por metro lineal de tubería.

Según lo consignado en el RAS 2000 modificado por la Resolución 0330 de 2017, se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones para el diseño de la bocatoma:

- **Caudal de diseño:** Será hasta dos veces el QMD; pero el excedente debe devolverse a la fuente. (Resolución 0330 de 2017 Título 2, Capítulo 2, Artículo 47, Parágrafo 1).
- La estructura se debe ubicar de tal manera que siempre este cubierta por una lámina de agua.
- Toda la tubería debe quedar protegida por el gavión.
- Se debe garantizar el correcto anclaje del gavión para evitar que sea arrastrado por la corriente.

Debido a que los caudales no fueron objeto de mayoración se toma como caudal de diseño el propuesto para la PTAP de **4,4 l/s**, contando con un verdedero de excesos en caso de aumentar el flujo de agua captado. Se obtiene así

una estructura de gavión de 1,1 m de largo por 0,5 m de ancho por 0,6 m de alto, estructura sobre la cual se apoya la tubería perforada que captará el agua cruda, la cual se conduce hasta el sistema de desarenado.

Anexo al informe se presentan las memorias de cálculo del diseño de la bocatoma lateral sumergida, junto con el plano de diseño y ubicación de ésta.

## 5.2. Sistema de pretratamiento - Desarenador

Con el fin de remover los materiales gruesos y algunos finos transportados en el agua captada a través de la bocatoma, y también para evitar la entrada de partículas indeseables que pueden disminuir la eficiencia de las operaciones realizadas en la Planta de Potabilización proyectada; se proyecta un desarenador en poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) el cual estará ubicado a 114,54 m de la bocatoma, sobre la cota 2247,0 m.s.n.m.

Algunos de los parámetros de diseño que se tuvieron en cuenta según el RAS 2000 y la Resolución 0330 de 2017 para el dimensionamiento del sistema de desarenador se enuncian a continuación:

- **Caudal de diseño:** El caudal de diseño del desarenador se toma como el caudal de diseño de la PTAP de 4,4 l/s, esto debido a que los caudales no son objeto de mayoración según lo consignado en la resolución 0844 de 2018.
- **Relación dimensiones de la estructura:** Se recomienda que la relación entre la longitud útil del desarenador y la profundidad efectiva para almacenamiento de arena sea 3 a 6. (Sugerido en el RAS/2000 Título B, Literal B.4.4.6.4).
- **Profundidad de la tolva de arenas:** La profundidad efectiva para el almacenamiento de arena en el desarenador debe estar comprendida entre 0,75 m y 1,50 m; aunque también puede ser que la altura de la tolva sea igual a la altura útil de la estructura. (Sugerido en el RAS/2000 Título B, Literal B.4.4.6.4).
- **Sistema de evacuación de arenas:** El dispositivo para la evacuación de arenas debe tener una pendiente superior del 10 % para obtener una eficiente evacuación del producto desarenado (Resolución 0330/2.017 Título 2, Capítulo 2, Artículo 55).

- **Rebose y limpieza:** Dichos dispositivos deben conectarse a una tubería o canal de descarga cuyo diámetro o ancho sea como mínimo de 25 cm y/o tener una pendiente superior al 2% (Sugerido en el RAS/2000 Título B, Literal B.4.4.6.6).
- **Velocidad de sedimentación:** La relación entre la velocidad horizontal y la velocidad de sedimentación de las partículas a remover, debe ser menor de 20 (Resolución 0330/2.017 Título 2, Capítulo 2, Artículo 55).
- **Tratamiento posterior a la desarenación:** Para aguas sometidas a tratamiento posterior, la velocidad horizontal máxima en el desarenador debe ser inferior a 0,25 m/s. Se requiere prever la eliminación de partículas con diámetro mínimo 0,1 mm. (Resolución 0330/2.017 Título 2, Capítulo 2, Artículo 55).
- **Peso específico de las partículas:** El peso específico de las arenas a remover en el desarenador, será  $2,65 \text{ g/cm}^3$  (Resolución 0330/2.017 Título 2, Capítulo 2, Artículo 55).
- **Pantalla deflectora de flujo:** La velocidad a través de los orificios no exceda de 0,20 m/s (Acueductos. Teoría y Diseño, Corcho Romero, Freddy Hernán Pág 187 Numeral 4.2.2).

Anexo al informe se presentan las memorias de cálculo del dimensionamiento del sistema de desarenador como tratamiento primario, allí se evidencian los cálculos y la metodología de diseño. El desarenador proyectado en PRFV se conforma de los siguientes componentes:

- **Zona de entrada:** El sistema de entrada al desarenador se compone de una cámara de 0,40 m de ancho por 0,60 m de alto, esta estructura presenta un rebose en tubería de 4" de diámetro para evacuar excesos de caudales debido a crecientes que se presentan en el afluente por fuertes lluvias o descargas no contempladas.

Previo a la entrada a la cámara se presenta un Bypass en caso de mantenimiento y/o reparación del sistema de desarenador, con este se garantiza el suministro de agua cruda a la PTAP.

- **Pantalla distribuidora de flujo:** Se instalará con el fin de eliminar corto circuitos y distribuir el flujo uniformemente en toda el área del desarenador,

la pantalla en PRFV está conformada por una parte horizontal y otra vertical, está ubicada a lo ancho del desarenador como se especifica en el plano de diseño adjunto al informe.

- **Zona de sedimentación:** Esta zona tendrá dimensiones de 0,60 m de ancho, 1,80 m de largo y 1,40 m de alto medidos desde la lámina de agua hacia el fondo donde empieza la zona de almacenamiento de arena; cabe anotar que entre la zona de decantación y la zona de arenas no hay ningún elemento o sistema que separe las zonas físicamente.

Contará hacia la salida de la zona de sedimentación con una pantalla de 1,05 m de alto y 0,60 m de ancho, con el objetivo de prevenir la salida de natas y flotantes; esta pantalla está ubicada a 0,60 m con respecto al vertedero de salida.

- **Zona de almacenamiento de arena:** Almacenara las arenas que se remueven en el desarenador, tendrá una longitud de 2,40 m, un ancho de 0,60 m y una profundidad útil de 0,15 m. Para su extracción se contará con una tubería de purga en PVC de 4" de diámetro y una válvula mariposa de 4" que accionará el operador cuando sea necesario.
- **Páneles de sedimentación acelerada:** Se encuentran, antes del vertedero de salida, páneles de sedimentación acelerada, esto con el fin de realizar un pulimiento final al proceso de desarenado. Los mencionados páneles son de 0,60 m de ancho por 0,60 m de largo por 0,60 m de alto, y el detalle de ubicación y diseño se plantean en el plano adjunto de diseño del desarenador.
- **Zona de salida:** La zona de salida se diseña de tal manera que permita un flujo constante, y mantenga la velocidad por debajo de la velocidad de arrastre (velocidad horizontal), con el fin de evitar la resuspensión de las partículas sedimentadas, tendrá una dimensión de 0,60 m de separación entre el vertedero y el muro y 0,60 m de alto. La zona de salida contará con un vertedero rectangular en PRFV de ancho 0,60 m, y tubería de salida hacia la conducción en PVC-P RDE21 4" de diámetro.

### 5.3. Conducción de agua cruda

La tubería que transportará el agua desde el desarenador hasta la planta de tratamiento de agua potable fue diseñada bajo todos los criterios técnicos estipulados para tuberías que trabajan con condiciones hidráulicas de flujo a presión y teniendo en cuenta las recomendaciones del RAS 2000 modificado por la Resolución 0330 de 2017.

La selección del diámetro se determinó con base en las recomendaciones propuestas en el RAS 2000 modificado por la Resolución 0330 de 2017, el cual sugiere que para aducciones o conducciones que trabajen a presión el diámetro mínimo nominal deberá ser 50 mm, por tanto, se eligió 110mm como diámetro adecuado para la conducción del sistema de agua cruda, la cual tiene una longitud total de 8576 metros.

Se proyectan válvulas de ventosa en los puntos altos de la red y válvulas de purga en los puntos bajos, con el fin de evacuar y evitar bolsas de aire dentro de la tubería y el agua restante en casos de mantenimiento y/o limpieza. Los cálculos de la red de conducción de agua cruda, el trazado en planta y perfil así como las características de ubicación de las válvulas se presentan en adjuntas al informe en las memorias de cálculo y el plano de diseño.

## Capítulo 6

# Planta de Tratamiento de Agua Potable

### Introducción

En el presente capítulo se establece el diseño de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (desde ahora PTAP) del antiguo Espacio Territorial de Capacitación y Reincorporación ETCR, con base en las características presentadas en el capítulo de viabilidad sanitaria, partiendo de los parámetros de caudal y caracterización de las aguas crudas, definiéndose así el tren de tratamiento óptimo, producto de la evaluación de la metodología de selección de alternativas, para su implantación en el antiguo ETCR.

Como variables principales de diseño se encuentra la población proyectada de **1995 hab** para el año 2046, y el caudal de diseño del sistema de tratamiento el cual corresponde a **4,4 l/s**. Así como las características de calidad del agua de la fuente escogida para el diseño (Ver Tabla 15), se asume una calidad de regular a deficiente, esto por posibles intervenciones antrópicas o por alteración de la calidad de agua de la fuente en temporada de lluvia.

Evaluando las diferentes tecnologías de tratamiento propuestas en el capítulo de Metodología de Alternativas y escogiendo la óptima con base a la matriz multicriterio, se establece el tren de tratamiento del agua cruda dentro de la planta y el diseño hidráulico de ésta, el cual se compone de:

- Aducción
- Dosificación de productos químicos para clarificación
- Floculador-Sedimentador de Manto de Lodos (FSML): dos (2) módulos

- Filtración rápida descendente: cuatro (4) módulos
- Desinfección en tanque de contacto
- Tanque de almacenamiento
- Pozo de lodos
- Espesador de lodos
- Lechos de secado

El proceso de tratamiento seleccionado se puede observar en el Diagrama de flujo de procesos (Figura 56), donde se listan las características principales de los procesos unitarios tanto en la línea de tratamiento de aguas como de lodos. A continuación se presenta el esquema 3D planteado para la PTAP en la Figura 55.



Figura 55: Esquema 3D de la PTAP.

## 6.1. Diagrama de flujo de procesos

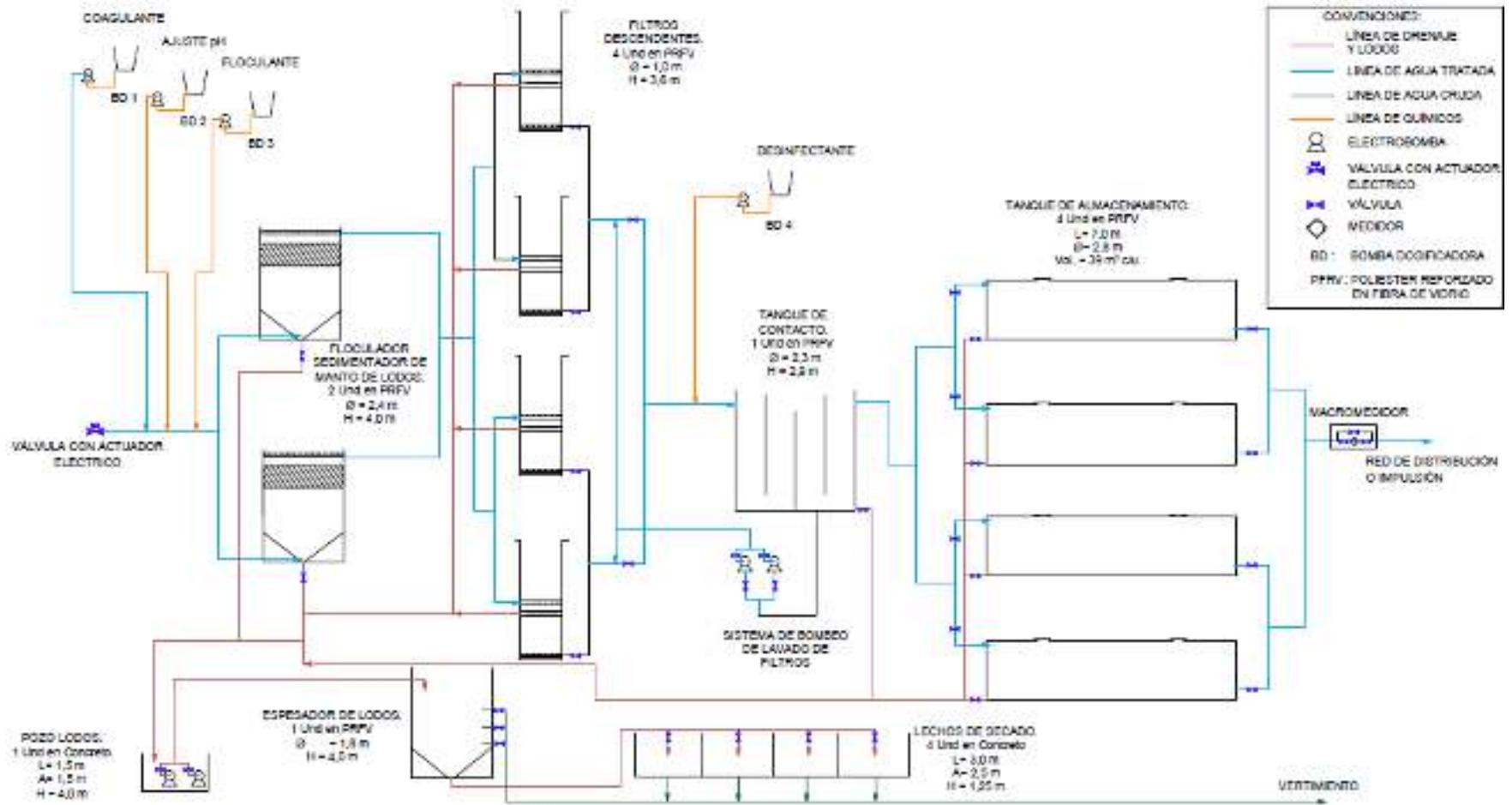


Figura 56: Diagrama de flujo de procesos en la PTAP.

## 6.2. Tren de tratamiento de aguas

Partiendo de las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua asumida de entrada al sistema de potabilización, se procede a diseñar los procesos unitarios que conformarán el orden lógico de tratamiento, para esto se define una línea base de parámetros de interés a remover, los cuales den cumplimiento a la normativa vigente de agua potable resolución 2115 de 2007, garantizando así las variables fundamentales para los sistemas de acueducto correspondientes a cantidad, calidad y continuidad. Algunos de los procesos de remoción de ciertos parámetros que se encuentran en el agua cruda se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23: Procesos de remoción de parámetros del agua cruda.

Parámetro	Proceso de remoción
Turbidez(NTU)	Coagulación-floculación-sedimentación
Color aparente (UNC)	Coagulación-floculación-sedimentación
Coliformes totales (NMP/100 ml)	Desinfección
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	Desinfección
Aluminio Total (mg Fe/l)	Precipitación química-Coagulación-floculación-sedimentación

### 6.2.1. Dosificación de productos químicos para clarificación y desinfección

Para realizar un proceso óptimo de clarificación es fundamental realizar ensayos de laboratorio o prueba de jarras para encontrar los productos químicos en las dosis adecuadas que simplifiquen el tratamiento a un menor costo, de acuerdo a las características del agua cruda se contempla que el sistema pueda contar con todos los procesos convencionales de la tecnología, para ello se proyecta tener la posibilidad de dosificar coagulante, modificador de pH y floculante, antes del Floculador-Sedimentador de Manto de Lodos (FSML) con el fin de generar la separación física de sólidos aglomerados por decantación.

Adicionalmente se dosificará un desinfectante para la eliminación o destrucción de agentes patógenos presentes en las aguas, los cuales son los responsables de enfermedades de origen hídrico.

### 6.2.1.1. Cálculo de la dosificación de coagulante

La determinación de la dosis de coagulante a suministrar depende en gran medida de la variación de la calidad de agua cruda, estas deben ser ajustadas a diario o cuando se presente desmejoramiento de la calidad del agua a tratar, para el diseño del sistema se parte de una concentración (C) del 5% en la solución a dosificar. Para la preparación se cuenta con un volumen de tanque de dosificación de 100 L (V), a los cuales se le agrega una cantidad de 5,0 kg de coagulante para lograr la concentración indicada anteriormente. Con el valor de densidad del coagulante de  $251,18 \text{ kg/m}^3$  ( $\rho_w$ ) se halla el volumen de coagulante líquido requerido para la concentración mencionada:

$$Vol_{coag} = \frac{C \cdot V}{100 \cdot \rho_w} \quad (6.1)$$

El cual da un resultado de 19,9 L de coagulante líquido para su disolución en agua para alcanzar la concentración esperada, de esta forma se obtiene la preparación la solución a dosificar a partir de producto en estado sólido o líquido. La cantidad de coagulante a dosificar se calcula como la variable  $P_1$  de la forma:

$$P_1 = \frac{D \cdot Q}{1000} \quad (6.2)$$

Siendo D la dosis de coagulante estimada de 20,0 mg/l y Q el caudal a tratar en la PTAP. Adicional a esto se calcula el caudal de la disolución de coagulante de la forma,

$$q = \frac{P_1 \cdot 100}{C} \quad (6.3)$$

Los resultados para dos opciones de caudal de tratamiento en la PTAP, el caudal de diseño y la mitad de este, se pueden observar en la Tabla 24 y en las memorias de cálculo anexas al informe de diseño, esto con el fin de la modulación del tratamiento.

Tabla 24: Dosificación de coagulante.

Caudal a tratar $Q$ (l/s)	Cantidad a dosificar $P1$ (kg/min)	Caudal a dosificar $q$ (l/h)
2,22	0,003	0,80
4,43	0,005	1,60

### 6.2.1.2. Ajuste de pH y floculación

El proceso físico-químico puede estar acompañado de dosificación adicional para ajuste de pH del agua a tratar y un floculante o ayudante de floculación, esto dependiendo de las características del agua cruda. Las dosis de los químicos mencionados anteriormente dependen de la prueba de tratabilidad del arranque y puesta en marcha de la PTAP y se diseñan bajo la misma filosofía de cálculo que coagulación.

### 6.2.1.3. Cálculo dosificación de desinfectante

Para la desinfección del agua, se aplica un químico con poder oxidante previo al tanque de contacto, lo que permite la mezcla del químico con el agua tratada. El desinfectante universal en los sistemas de tratamiento es el cloro, el cual posee ventajas como poder bactericida, virulicida, eficacia contra patógenos y capacidad de remanencia, además de su facilidad de preparación y aplicación, lo cual tiene incidencia directa en los costos operativos. El desinfectante viene en presentaciones sólidas y líquidas, como hipoclorito de calcio e hipoclorito de sodio respectivamente.

Para el diseño se propone una desinfección mediante una solución diluída al 2% de hipoclorito de sodio, para una dosificar una concentración de 2,0 mg/l. La presentación viene con una concentración líquida al 15 %, y se mezcla con un volumen de 100 L de agua, para alcanzar la concentración mencionada se requiere de 13,3 L de desinfectante líquido. Cabe resaltar que el punto de aplicación del desinfectante se localiza entre la unidad de filtración y el tanque de contacto.

Las dosis de desinfectante depende de la demanda de cloro del sistema, las cuales se calibran una vez este está en operación; los resultados de caudal a dosificar para los caudales modulados se presentan en la Tabla 25.

Tabla 25: Dosificación desinfectante en la PTAP.

Caudal a tratar Q (l/s)	Caudal a dosificar q (ml/min)
2.22	13.30
4.43	26.60

### 6.2.2. Floculador-Sedimentador de Manto de Lodos (FSML)

El floculador tipo manto de lodos es un tanque con algún medio de mezcla rápida, suave y lenta, con un tiempo de retención relativamente corto que por la formación de un manto de lodos, proporciona al agua un proceso de pre-sedimentación (Figura 57).

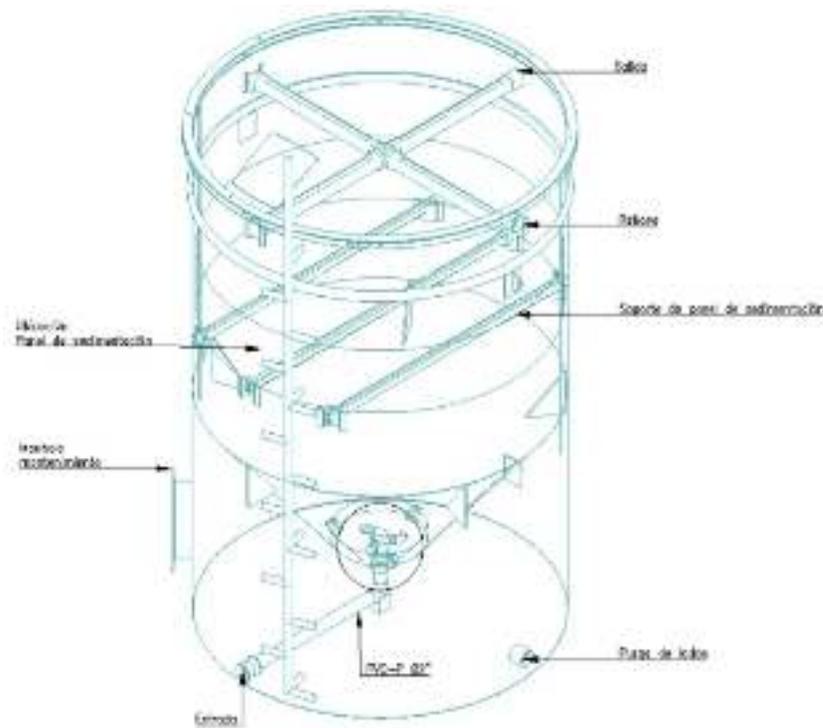


Figura 57: Esquema Floculador Sedimentador de Manto de Lodos (FSML).

En esta unidad se dan los procesos de coagulación, floculación y sedimentación, cuando se genera la dosificación de coagulante se presenta la desestabilización de las partículas coloidales, dicha dosificación se da en línea para generar por medio de turbulencia en la tubería la mezcla rápida, a este proceso se le conoce como proceso de coagulación y se presenta antes del ingreso al floculador, seguido se da el proceso de floculación el cual consiste en la unión de las partículas desestabilizadas para así ganar peso y sedimentar, estos dos últimos

procesos se dan al interior del FSML, en donde las partículas sedimentadas son almacenadas en una tolva, la cual esta dimensionada para contener el volumen de lodos de  $0,50 m^3$ , que corresponde al volumen producido durante un (1) día de funcionamiento del sistema aproximadamente.

Se dimensiona entonces el FSML con un diámetro de 2,40 m y una altura total de 4,00 m de donde 0,44 m es la altura de floculación, 0,6 m la zona de sedimentación acelerada, 1,27 m la altura de la tolva de lodos, 0,65 m la altura entre paneles y canaleta, 0,10 m la altura de la canaleta y un borde libre del FSML de 0,3 m. Las dimensiones más específicas se presentan en la Tabla 26.

Tabla 26: Dimensiones del FSML.

Parametros/ Datos	Valor	Unidad
Área de floculador (Af)	4,52	$m^2$
Pendiente de la tolva (PT)	50°	°
Altura difusor (Hdf)	0,6	m
Diámetro de fondo de tolva (Dftv)	0,66	m
Altura de la tolva cónica de lodos (HC)	1,27	m
Volumen de la tolva cónica de lodos (VC)	1,90	$m^3$
Altura zona sedimentación acelerada	0,60	m
Altura entre paneles y canaleta	0,65	m
Altura Total Canaleta (ht)	0,10	m
Borde libre floculador (BL)	0,30	m
Altura floculacion (Alt floc)	0,44	m
Altura útil floculador (Alt floc)	1,80	m
Altura total floculador (Alt floc)	4,00	m
Volumen del cilindro (VCI)	8,1	$m^3$
Volumen total del floculador (VT)	10,0	$m^3$
Tiempo de detención hidráulico (TDH)	1,3	h

Para propiciar la sedimentación acelerada se usarán paneles de tasa alta tipo colmena, fabricados en PVC o similar, los cuales tienen una inclinación de conductos de 60° y longitud estándar de 60 cm, los cuales se localizan encima del distribuidor de entrada y por debajo de las canaletas de recolección del clarificado, se diseñan bajo recomendaciones del RAS 0330 de 2017, Art. 113.

Se proponen dos módulos para Floculador-Sedimentador de Manto de Lodos (FSML), cada módulo funcionará a un caudal de 2,2 l/s, para un caudal total de 4,4 l/s. Anexo al informe se presentan las memorias de cálculo donde se dimensiona la estructura de FSML con sus respectivas ecuaciones de diseño según literatura y normatividad aplicada.

### 6.2.3. Sistema de filtración

Los filtros en arena (Figura 58) son utilizados para retirar la carga contaminante presente en el agua después de su paso por un tratamiento primario o secundario, este filtro retiene partículas de hasta 20 micras de tamaño, y su eficiencia depende de varios parámetros como: la forma, la altura del lecho filtrante, el tipo de material, su granulometría y la velocidad de filtración, entre otras.

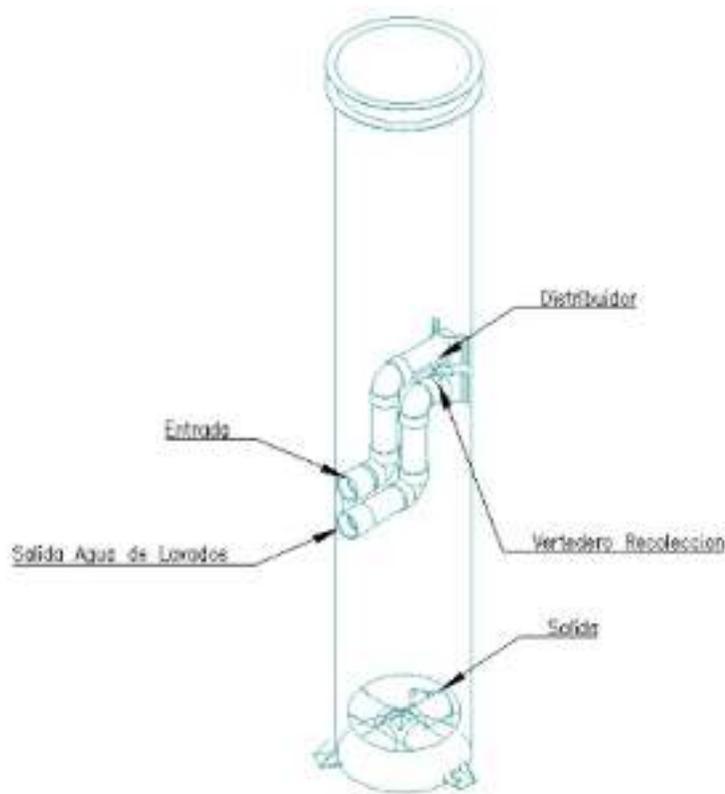


Figura 58: Esquema del filtro en arena.

Según lo consignado en el RAS 2000 y en la resolución 0330 de 2017 que lo modifica, se deben considerar para los filtros rápidos con lecho en arena una ta-

sa de infiltración menor a  $120 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$  y una profundidad del medio filtrante entre 0,6 a 0,9 m. Adicionalmente, el lecho filtrante va soportado en un medio granular estratificado, el cual evita la pérdida del material por arrastre del fluido durante el proceso de filtración y retrolavado. Se proponen 4 filtros con lecho de arena de operación descendente, cada uno funcionará a caudal de 1,1 l/s, y para la operación de lavado se complementará con la presión y el caudal ejercido por una electrobomba con el fin de alcanzar la velocidad ascensional requerida para la expansión del lecho filtrante de acuerdo a lo establecido en la Res. 0330 de 2017 Art. 114 (Ministerio de Vivienda, 2017).

Para realizar el proceso de retrolavado, el caudal requerido por filtro es de 8,0 l/s, para un tiempo de lavado de cada uno de 7 min, lo que genera un volumen de agua de lavado de  $3,36 \text{ m}^3$  que se purga hacia el pozo de lodos para luego ser conducido al tratamiento de espesamiento y deshidratación. Las dimensiones generales del sistema de filtración se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27: Dimensiones del filtro propuesto.

Parametros/ Datos	Valor	Unidad
Diámetro final del filtro ( $\text{Øf}$ )	1,00	m
Altura material de soporte	0,60	m
Altura medio filtrante	0,90	m
Altura lecho expandido	1,13	m
Altura entre vertederos	0,25	m
Diámetro vertedero de distribución	4,00	pulg
Altura a vertedero de lavado	1,83	m
Diámetro vertedero de lavado	4,00	pulg
Pérdidas en filtración	0,48	m
Borde libre	1,50	m
Altura total filtro	3,60	m

La frecuencia del lavado de los filtros depende de la colmatación del mismo, que es directamente proporcional a la calidad del agua, y se puede observar representada en la pérdida de cabeza de energía antes de atravesar el medio filtrante.

La tasa de infiltración calculada para los filtros es de  $120 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$  para una

velocidad de infiltración de 0,14 cm/s. Las memorias de cálculo del chequeo del lavado de los filtros, de expansión del medio filtrante, de chequeo hidráulico y de pérdida de energía se especifican anexas al informe junto con las ecuaciones de cálculo y recomendaciones según literatura y normatividad aplicada.

#### 6.2.4. Tanque de contacto

Para la desinfección del agua filtrada, se requiere de un tanque de contacto con un volumen determinado que garantice los tiempos de detención mínimos para la mezcla hidráulica del desinfectante con la masa de agua, y así poder eliminar o destruir los microorganismos patógenos que se puedan presentar en esta fase del proceso.

El diseño del tanque se realiza para un tiempo de detención de 40 minutos para el caudal total de diseño de 4,4 l/s, tiempo suficiente para alcanzar valores de concentración-tiempo ( $C \cdot T = K$ ) requeridos para la inactivación de coliformes totales por cloro libre para  $\log_3$ . El dimensionamiento del tanque de contacto se puede observar en la Tabla 28.

Tabla 28: Dimensiones del tanque de contacto.

Parámetro	Valor	Unidad
Tiempo de contacto	40	min
Caudal de diseño	4,4	l/s
Volumen del tanque de contacto	10,56	$m^3$
Borde libre	0,3	m
Altura útil del tanque de contacto	2,60	m
Área requerida para el tanque	4,06	$m^2$
Diámetro del tanque	2,27	m
Diámetro adoptado	2,30	m
Altura total del tanque de contacto	2,90	m

El tanque de contacto se propone de cuatro (4) cavidades (Figura 59) para la mezcla del agua, este se puede apreciar en el diagrama de flujo de procesos y en los planos hidráulicos adjuntos al informe de diseño. Dicho tanque tendrá el volumen requerido para los lavados de filtros. Anexo al informe se presentan igualmente las memorias de cálculo del tanque de contacto.



Figura 59: Esquema Tanque de contacto.

### 6.2.5. Tanque de almacenamiento

El volumen mínimo requerido de almacenamiento de agua tratada, según el Art. 81 de la resolución 0330 de 2017, para la demanda proyectada en el año 2046, es de  $146 \text{ m}^3$  al día, para garantizar dicho almacenamiento se establece cuatro (4) tanques de almacenamiento de  $39,33 \text{ m}^3$  cada uno, estas cuatro unidades estarán comunicadas por medio de una tubería inferior que facilita las labores de mantenimiento. el dimensionamiento del tanque se presenta en la Tabla 29 y un esquema del conjunto de tanques se puede observar en la Figura 60.

Tabla 29: Dimensiones del tanque de almacenamiento.

Parámetros/ Datos	Valor	Unidad
Número de tanques (N)	4	un
Volumen requerido del tanque	36,5	$\text{m}^3$
Largo asumido del tanque	7,00	m
Borde libre (BL)	0,40	m
Lámina de agua en el tanque	2,40	m
Radio adoptado del tanque	1,35	m

Tabla 29 continúa de la página anterior

Área útil del tanque	5,38	$m^2$
Volumen útil del tanque	39,33	$m^3$
Volumen total del tanque	43,10	$m^3$

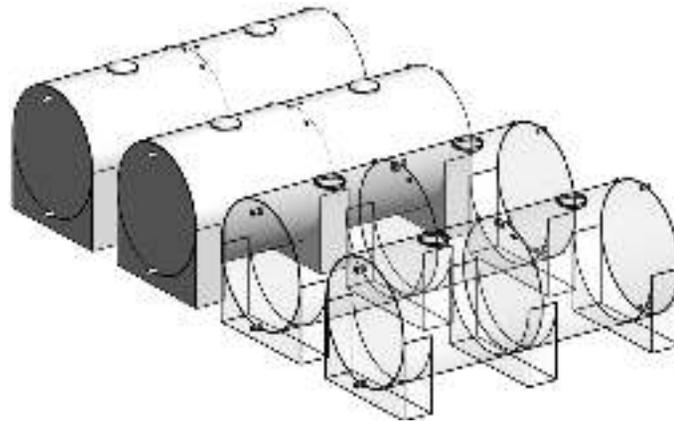


Figura 60: Esquema Tanques de almacenamiento.

Debido a la eventual necesidad de desocupar por completo alguno de los tanques a causa de actividades de limpieza, reparación o mantenimiento, se realiza a continuación el chequeo del orificio de vaciado y desagüe, tomando en cuenta la carga hidráulica y el diámetro del orificio de desagüe (Tabla 30).

$$q_e = C_d \cdot a \cdot \sqrt{2gh} \tag{6.4}$$

Tabla 30: Tiempo de vaciado del tanque.

Parámetros/ Datos	Valor	Unidad
Coefficiente de descarga (Cd)	0,6	
Diámetro del orificio (Øo)	4,00	pulg
Área del orificio (a)	0,008	$m^2$
Gravedad (g)	9,81	$m/s^2$
Carga hidráulica sobre el orificio (ho)	2,40	m
Caudal descargado (Qe)	0,033	$m^3/s$
Caudal descargado (Qe)	33,4	l/s
Duración de la descarga (t)	209,71	seg
Duración de la descarga (t)	3,50	min

El dimensionamiento y los chequeos hidráulicos adicionales al diseño se encuentran especificados en las memorias de cálculo anexas al informe de diseño. El agua tratada se encuentra así disponible desde el tanque de almacenamiento para la red de distribución en el antiguo ETCR para consumo humano, cumpliendo con la normatividad de calidad de agua potable (Ministerio de Ambiente, 2007).

### **6.3. Tren de tratamiento de lodos**

Los lodos decantados en el Floculador Sedimentador de Manto de Lodos y los producidos en el proceso de lavado de los filtros serán dirigidos hacia el pozo de lodos desde donde a través de un sistema de electrobomba serán impulsados al proceso de espesamiento hidráulico, el cual consiste en almacenar en un tanque, el agua lodo generado, dando un tiempo de detención hidráulico para generar una separación entre el lodo y agua clarificada, el agua clarificada es dirigida hacia los desagües para un vertimiento, y los lodos espesados son dirigidos hacia los lechos de secado para terminar el proceso de deshidratación.

#### **6.3.1. Pozo de lodos**

Dentro del tren de tratamiento se incorpora un pozo de lodos el cual tiene el objetivo de recoger las purgas de unidades a gravedad, por lo tanto este se encuentra soterrada y desde la cual, por medio de electrobombas, se evacúan los lodos hacia el proceso de espesamiento.

Las dimensiones propuestas son de 1,5 m de ancho por 1,5 m de largo y 1,5 m de profundidad. Las electrobombas de la unidad son de tipo sumergible con paso de sólidos de 50 mm, con capacidad de entregar 1,0 l/s a 6 m de altura, incluyendo pérdidas de energía por fricción y accesorios, estas características de bombeo son muy comunes entre este tipo de bombas, de fácil consecución con proveedores y de alta eficiencia para minimizar costos energéticos. Cabe resaltar que los tiempos de operación al día dicho bombeo son inferiores a una (1) hora.

#### **6.3.2. Espesador hidráulico**

El espesamiento de los lodos es generalmente la primera etapa del tratamiento de lodos. Para el espesamiento de los lodos en la PTAP se diseña un

espesador de tipo hidráulico (Figura 61), este remueve un porcentaje importante de la humedad presente, para producir un lodo de mayor concentración que pueda disminuir los volúmenes de la operación de deshidratación de lodos.



Figura 61: Esquema del espesador hidráulico.

El volumen del espesador de lodos es igual al volumen del agua de lavado de dos (2) filtros más el volumen de lodos producidos en el FSML, en total el espesador hidráulico trata un volumen de  $7,65 \text{ m}^3/d$ . El espesador hidráulico presenta unas dimensiones de **1,80 m** de diámetro y **0,20 m** de diámetro inferior de la tolva. Una altura total de **4,00 m** donde **0,80 m** es la altura de la tolva cónica de lodos, **2,90 m** la altura del espesador y **0,30 m** el borde libre asumido.

En el espesamiento presenta una remoción teórica del 70 % de la humedad presente en el lodo, dejando así un volumen espesado de lodos de  $2,3 \text{ m}^3$  que pasa a deshidratación de lodos mediante lechos de secado, y un clarificado de  $5,4 \text{ m}^3$ .

### 6.3.3. Lechos de secado

La deshidratación de los lodos provenientes del espesador hidráulico se realiza mediante lechos o eras de secado, el cual tiene como objeto reducir el contenido

de agua en el lodo a menos de un **10 %** y con concentración de sólidos mayores al **25 %**, un esquema de este puede verse en la Figura 62. El volumen de lodos a deshidratar diariamente es de  $2,3m^3/día$ , dicho volumen se dispondrá en una celda de secado con un espesor de capa de lodo de **0,3 m**. Con estos requerimientos se dimensiona la celda de secado requerida siendo esta rectangular de ancho **2,0 m** y largo **3,0 m**.

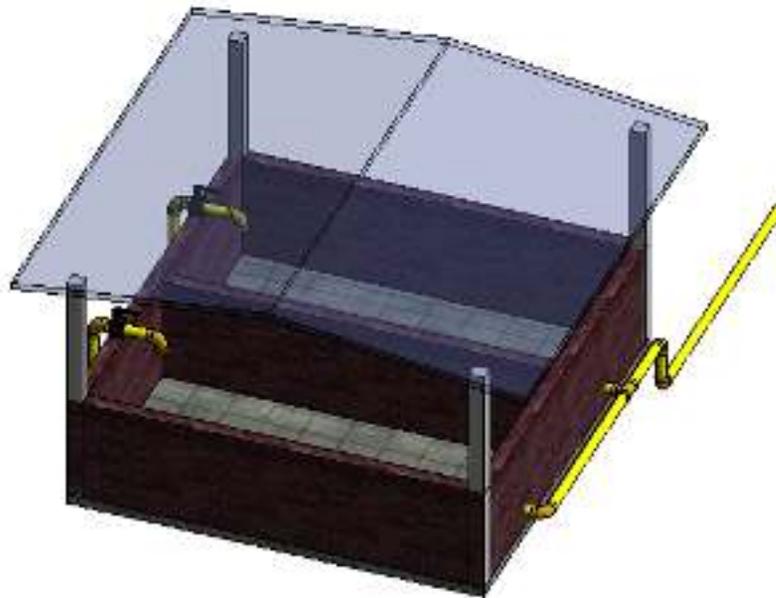


Figura 62: Esquema de los lechos de secado.

La entrada a los lechos se realiza mediante tubería que permite el paso de estos sin generación de obstrucción. El lecho filtrante está constituido por una capa superior de **0,1 m** de material de cobertura o ladrillo, luego una capa de arena gruesa de **0,3 m**, después se realiza una capa de grava de  $3/4''$  a  $1/2''$  de **0,1 m** de espesor y luego una capa de grava más gruesa de  $1''$  a  $3/4''$  de **0,1 m** de espesor (Romero Rojas, 2004). Debajo de la estratificación planteada anteriormente se instalará la tubería de PVC perforada para evacuar las aguas filtradas por la red general de drenaje de la PTAP hacia la descarga a fuente receptora.

Los espesores de cada capa requerida en el diseño del lecho de secado se pueden evidenciar con detalle en la Figura 63.

El proceso de secado se realiza durante 3 días, el lodo producido al día se va disponiendo en cada celda de secado y se van rotando durante la semana, al



Figura 63: Estratificación de la estructura del lecho de secado (medidas en metros).

tercer día se remueve la capa deshidratada para su disposición final. Se diseñan 4 celdas de lechos de secado en la PTAP para una operación más controlada de deshidratación de los lodos.

#### 6.4. Componentes generales

A continuación se presentan los componentes generales del diseño de la Planta de Tratamiento de Agua Potable, estos corresponden las unidades principales o las obras necesarias para el funcionamiento normal del sistema de tratamiento, la localización de dichos componentes dentro del área se plantean para seguir un tren de tratamiento lógico dentro y una hidráulica determinada, para tener un control preciso de los procesos unitarios dentro de la PTAP (Figura 64).

El proyecto de la PTAP presenta una distribución y diseño compacto que busca ocupar el menor espacio posible dentro del lote dispuesto, dejando andenes y espacios de tránsito donde se pueden movilizar peatones. La PTAP cuenta con una caseta de operación, donde se aloja la dosificación y almacenamiento de productos químicos así como herramientas de operación y el espacio para acondicionar el área de laboratorio.

##### 6.4.1. Caseta de operación

Construcción civil donde se realiza la operación general de la Planta de Tratamiento de Agua Potable. En el edificio de operaciones se realiza el control de la calidad del agua cruda y tratada, así como la verificación del correcto funcio-

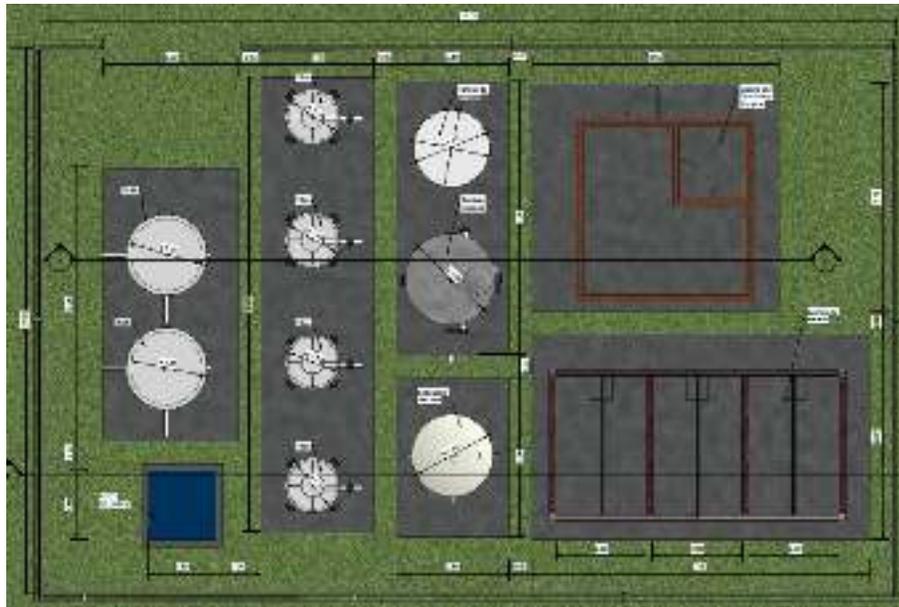


Figura 64: Vista en planta de la distribución propuesta en la PTAP.

namiento de cada una de las partes del tren de tratamiento. Esta debe contar con las áreas adecuadas para realizar un seguimiento y operación de todas las variables de funcionamiento, las cuales corresponden a:

- Área de preparación de químicos
- Dique de contención de derrames
- Laboratorio
- Oficina de control
- Área de tablero de control eléctrico
- Almacenamiento de químicos y herramientas

La caseta debe contar con unas dimensiones mínimas de 3,80 m x 3,50 m y una altura de 2,40 m, adicionalmente debe contar con buena iluminación y ventilación debido a en ella hay manejo de productos químicos. Además se debe contar con el servicio de energía eléctrica y abasto de agua tratada.

#### 6.4.2. Vías y andenes dentro de la planta

Dentro de la PTAP no se plantean vías pavimentadas ya que no se hace necesario el ingreso de vehículos pesados, sin embargo, se recomienda el diseño de

andenes para tránsito de personal de operación y mantenimiento de los procesos requeridos dentro de la planta, así como la remoción de sólidos producidos en la deshidratación de lodos en lechos de secado.

# Referencias

- Ministerio de Ambiente, V. y. D. T. (2007). *Resolución 2115 de 2007, 22 de junio, por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.* Autor.
- Ministerio de Vivienda, C. y. T. (2017). *Resolucion 0330 de 2017, 08 de junio, por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico (ras) y se derogan las resoluciones números 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009.* Autor.
- Romero Rojas, J. A. (2004). *Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño.* Bogotá, CO, *Escuela Colombiana de Ingenieros.*

## Capítulo 7

# Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

### Introducción

En el presente capítulo se establece el diseño de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas (desde ahora PTAR) del antiguo Espacio Territorial de Capacitación y Reincorporación ETCR, adjunto con las memorias de cálculo para cada proceso unitario de la planta y partiendo de las características presentadas en el capítulo de viabilidad sanitaria, donde se enuncian los parámetros fundamentales para el diseño como caudal de diseño y caracterización de las aguas servidas.

Como criterios de diseño principales se encuentra la población proyectada de 1995 hab para el año 2046, los cuales generan un caudal de diseño del sistema de tratamiento de 3,7 l/s, el marco teórico normativo del diseño, corresponde a los siguientes lineamientos:

- La resolución 0631 de 2015 que establece los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas (ARD).
- La resolución 0330 de 2017 o modificación al RAS (Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico) donde se especifican parámetros y condiciones de diseño de las diferentes estructuras de tratamiento de aguas residuales.
- La resolución 0844 de 2018 o RAS rural, que establece los criterios de diseño en materia de acueducto y saneamiento básico en sectores rurales.

Evaluando las diferentes tecnologías de tratamiento propuestas en el capítulo de Metodología de Alternativas y seleccionando con base a los aspectos de la matriz multicriterio, se establece que el tren de tratamiento del agua residual esta compuesto por las siguientes unidades:

- Pretratamiento (Cribado, desarenador y homogenización e igualación de caudales).
- Reactor biológico UASB
- Reactor FAFA
- Sedimentador secundario de alta tasa
- Canal de salida y aforo
- Lechos de secado

El proceso de tratamiento seleccionado y el dimensionamiento de las estructuras se especifica en el Diagrama de flujo de procesos (Figura 66), en la Figura 65 se puede observar un modelo en 3D del sistema.

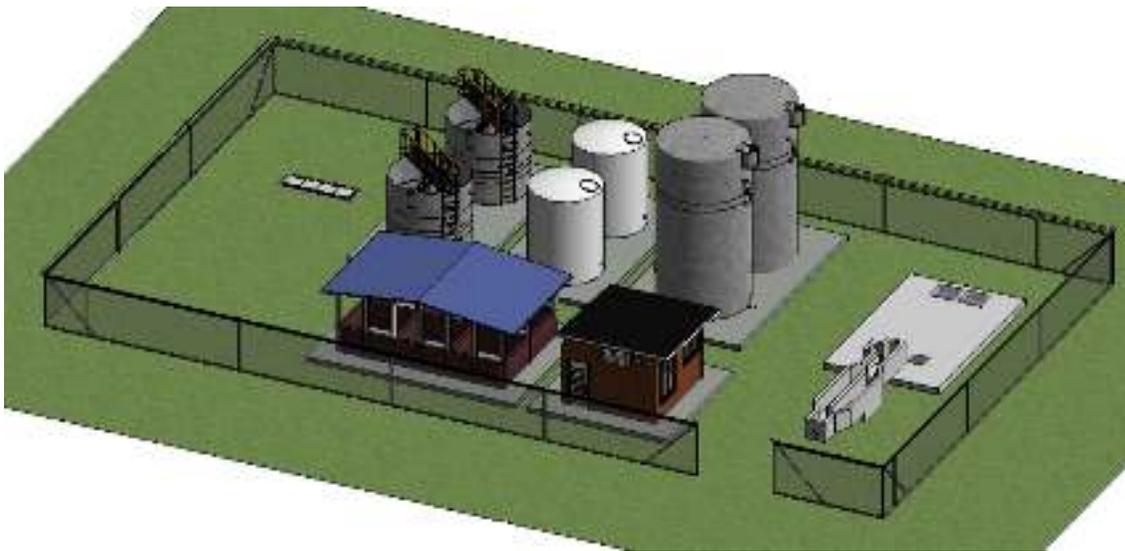


Figura 65: Esquema 3D de la PTAR.

## 7.1. Diagrama de flujo de procesos

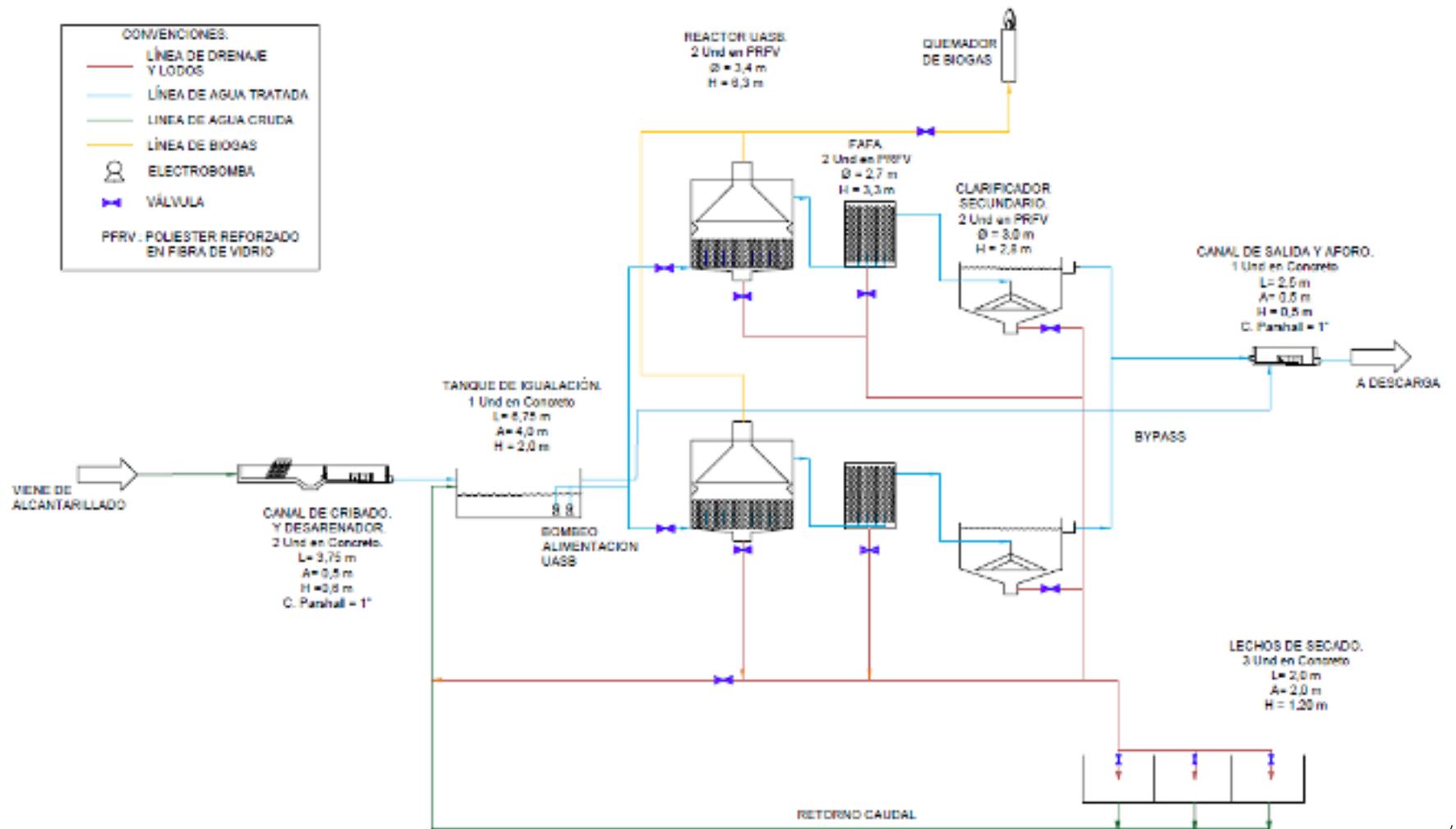


Figura 66: Diagrama de flujo de procesos en la PTAR.

## 7.2. Tren de tratamiento de aguas

### 7.2.1. Canal de entrada y pretratamiento

El tratamiento de las aguas residuales en la PTAR comienza con el canal de entrada a la planta de las aguas servidas, las cuales provienen del alcantarillado. El caudal de dimensionamiento del pretratamiento se estima como el caudal de diseño del sistema, según lo estipulado en la resolución 0844 de 2018 (Ministerio de Vivienda, 2018) el cual es **3,7 l/s**.

El canal de conducción de las aguas a través del pretratamiento se diseña con unas dimensiones hidráulicas de **0,50 m** de ancho x **0,60 m** de alto, como se especifica en las memorias de cálculo hidráulico y en los planos hidráulicos anexos al informe.

Las aguas se conducen entonces a un sistema de cribado fino para la retención de partículas de mayor tamaño, el cribado seleccionado cuenta con separación entre barras de **10,00 mm**. el mantenimiento del cribado es de operación manual de acuerdo al RAS 2000, para caudales menores a 100 l/s.

Como se aprecia en la Figura 67 el canal de entrada del agua se divide en dos módulos con capacidad total de tratamiento para suplir las actividades de mantenimiento y extracción de sólidos y arenas, el paso del agua es controlado mediante compuertas. Luego del cribado manual se encuentra un desarenador, con el fin de realizar una sedimentación primaria de las partículas de menor tamaño y arenas que logran pasar el cribado.

Las memorias de cálculo y dimensiones del desarenador se expresan en el Anexo 3. de pretratamiento en las memorias de diseño de la PTAR, donde la sección de canal en el desarenador será de ancho **0,50 m** x **0,9 m** de alto para reducir la velocidad de tránsito y sedimentar partículas de hasta 0,3 mm y con una densidad relativa media de  $2,65 \text{ g/cm}^3$ , la longitud total del desarenador es de **1,25 m**. La tolva del desarenador presenta una altura de diseño de **0,30 m** para un volumen total posible de almacenamiento de sedimentos de  $0,188 \text{ m}^3$ .

Luego del paso por el desarenador, se encuentra una estructura tipo canaleta Parshall donde se realizará medición de caudal entrante a la planta de trata-

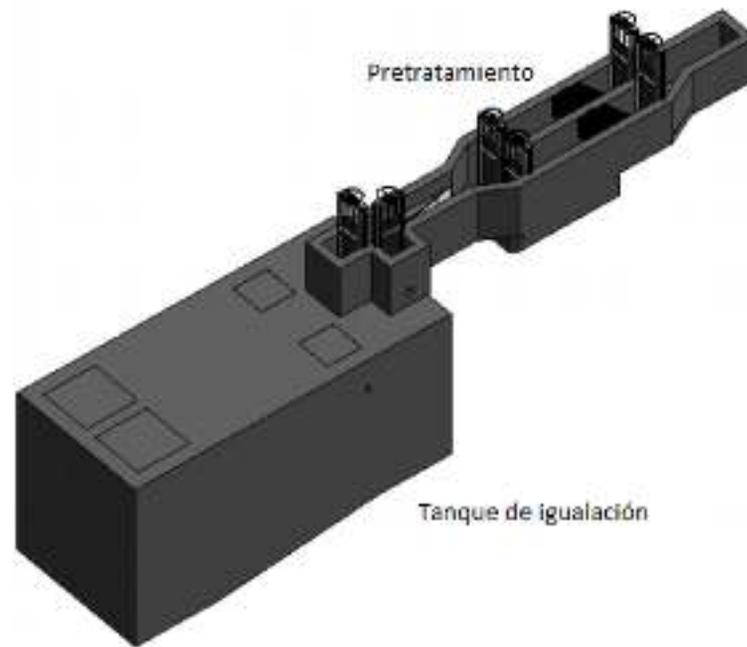


Figura 67: Canal de entrada y pretratamiento de las aguas residuales.

miento y toma de muestras del agua para evaluar las condiciones de calidad del agua de entrada, el ancho de garganta ( $W$ ) de diseño para la canaleta Parshall es de **1 pulgada**.

Luego de la canaleta Parshall se encuentra la estructura de paso al Tanque de igualación de la planta. Esta estructura se compone de 2 (dos) compuertas que permiten el paso hacia el Tanque de igualación que se encuentran debajo de la estructura de canal de entrada y pretratamiento. Se propone entonces un bajante de agua hacia el fondo del Tanque de igualación mediante una tubería de 4 pulgadas. Y como segunda estructura se propone un By-pass a la planta de tratamiento en caso de emergencia, desde esta estructura se conduce el agua mediante tubería de 4 pulgadas al canal de salida de la PTAR.

El agua entrante al canal de entrada y sistema de pretratamiento se encuentra con unas características correspondientes a la caracterización del agua citada en la Tabla 16 y mediante el proceso de cribado fino y desarenador teóricamente se remueve un 20 % de la Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ) con lo que al siguiente proceso de tratamiento que es el tratamiento biológico el valor de  $DBO_5$  disminuye.

### 7.2.2. Tanque de igualación de caudales

Después del canal de entrada y del pretratamiento de las aguas residuales, el agua se conduce a un Tanque de igualación. La función de esta unidad es soportar los picos de caudal que puedan presentarse durante el día. Estos altos niveles de caudal o picos se presentan especialmente durante las horas en que los habitantes se alistan para salir a sus trabajos o colegios y en la hora de regreso de estos. Como mecanismo para garantizar un caudal de entrada y salida constante la PTAR cuenta con un tanque de igualación que garantiza que a las unidades subsiguientes solo ingrese el caudal de diseño, el cual se establece en **3,7 l/s**.

La estructura se compone entonces de un Tanque de igualación con dimensiones de **4,00 m** de ancho, **6,75 m** de largo y **2,00 m** de altura total, incluyendo 0,30 m de borde libre. Este tanque presenta una pendiente hacia la zona de bombeo para facilitar un lavado del tanque. También se presenta un rebose de agua en la parte superior del tanque por si se presenta algún inconveniente con las bombas, este se conecta con la tubería de Bypass de la planta.

El tanque de igualación se puede apreciar en la Figura 67 junto con el respectivo canal de entrada y pretratamiento de las aguas residuales en la parte superior de éste, el material propuesto es en concreto reforzado. Todas las dimensiones y los tiempos de funcionamiento de los bombeos desde el tanque de igualación hasta su descarga en los reactores biológicos se encuentran en las memorias de cálculo hidráulico anexas al informe de diseño. Se calcula el bombeo en función del llenado del tanque de igualación y se estima un funcionamiento de las bombas de **22 horas** al día, para evitar tiempos prolongados de almacenamiento, que propicien la descomposición de materia orgánica en dicho tanque que genere olores fuertes.

### 7.2.3. Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente Mezcla Completa (UASB)

El UASB es un proceso biológico anaerobio donde el agua residual a ser tratada es introducida en el fondo del reactor a través de tuberías y pantallas que hacen que el paso del agua residual se realice en mezcla con la capa de lodo biodegradable y en digestión que se encuentra en el fondo de este, donde se pro-

duce una mezcla completa del agua residual cruda con los lodos en digestión, propiciando mejores condiciones de biodegradabilidad de la materia orgánica. Luego el agua fluye hacia arriba a través del lodo donde bacterias anaerobias realizan el proceso de depuración del agua residual. Los gases producidos bajo condiciones anaerobias (principalmente metano y gas carbónico) ascienden a la parte superior del reactor como se observa en la Figura 68.

Para el cálculo del reactor anaerobio el factor importante a tener en cuenta es el tiempo de retención hidráulico, para garantizar que las bacterias contenidas en el manto de lodos suspendidos tengan el tiempo necesario para atrapar la biomasa en suspensión. Un tiempo de retención hidráulico adecuado dependiente de la temperatura garantiza que el reactor mantenga el lecho bacterial metanogénico que hará la transformación de la biomasa en compuestos más simples y en gas, siendo este último extraído del reactor e incinerado de forma controlada.

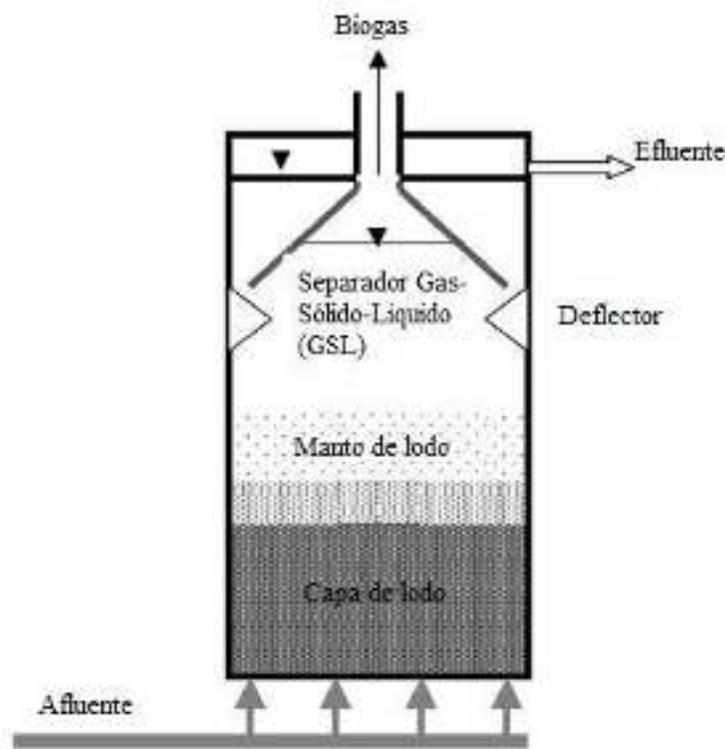


Figura 68: Esquema del reactor UASB.

Se realiza así el diseño de dos estructuras de tratamiento biológico anaerobio tipo UASB, estructuras de geometría circular de diámetro de **3,40 m** y altura

total de **6,30 m** en material de poliéster reforzado en fibra de vidrio (PRFV). El reactor UASB funcionan de forma en que las aguas crudas entran al reactor mediante bombeo desde el tanque de igualación un caudal de diseño de **3,7 l/s** donde se realiza la descomposición de la materia orgánica en el manto de lodos generado en el fondo del reactor, como se explica en los párrafos anteriores.

El volumen total del reactor UASB es de  $57,20 m^3$  para un tiempo de detención hidráulico (TDH) de **6 horas**, cumpliendo así con lo determinado en la resolución 0330 de 2017 (Ministerio de Vivienda, 2017) para este tipo de tecnologías, para este tiempo de detención se tiene una remoción teórica calculada de  $DBO_5$  del 71,4%, ingresando así al sistema de Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA) con una concentración de **62,9 mg/l** en el efluente del reactor UASB. El diseño completo se puede apreciar en las memorias de cálculo de diseño de la PTAR, entregadas junto al informe de diseño, específicamente en el Anexo 4.

#### 7.2.4. Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA)

El filtro anaerobio de flujo ascendente está compuesto por un medio de soporte fijo inerte al cual crecen adheridos los microorganismos utilizados en la reducción de materia orgánica. El agua residual que viene del UASB, ingresa a los FAFA por medio de tuberías perforadas en el fondo de los filtros (Figura 69), de manera que el flujo asciende verticalmente a través de la cámara atravesando el medio filtrante el cual se establece con una superficie de contacto de  $90 m^2/m^3$  y una profundidad total de capa de filtro de **2,8 m**.

El reactor FAFA se diseña para una tasa de carga orgánica volumétrica asumida de  $1,40 kg/DQO/m^3 \cdot día$  con la cual se calcula un volumen total de FAFA de  $16,59 m^3$ . Como dimensionamiento se diseña con una altura total de **3,0 m** (de los cuales 2,8 m son medio filtrante) y un diámetro de **2,7 m**, lo que genera un tiempo de detención hidráulico (TDH) de **2,5 horas**. El reactor FAFA se propone como pulimiento adicional para la degradación de la materia orgánica en el tren de tratamiento de la PTAR, se fracciona en dos módulos construidos en PRFV y material filtrante plástico que aumente el área de contacto.

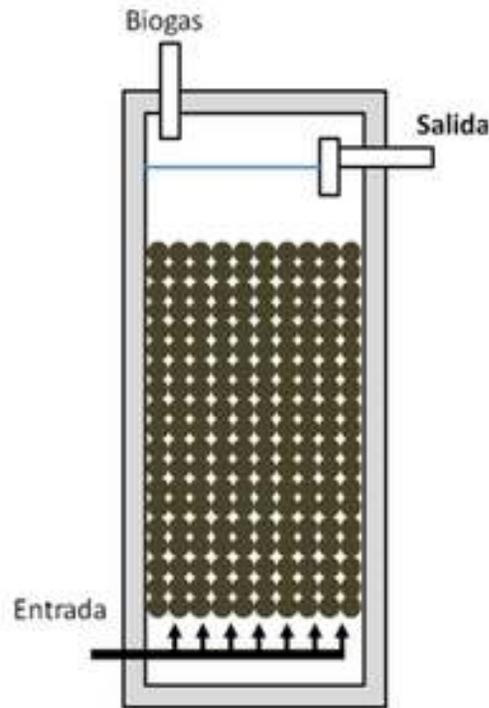


Figura 69: Esquema del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA).

### 7.2.5. Sedimentador secundario de alta tasa

Se diseña para la remoción de los sólidos que por arrastre se escapan de los reactores biológicos y para mejorar la calidad del clarificado del efluente de los reactores, en ellos el proceso físico que se lleva a cabo es la decantación y/o floculación de las partículas biológicas, el diseño de un Sedimentador secundario se complementa con paneles de Tasa Alta, que mejoran los rendimientos de remoción en áreas menores (ver esquema en la Figura 70).

Los sedimentadores, dos unidades en PRFV se diseñan para una caudal proveniente de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA) de **3,7 l/s**, en ellos se realiza entonces la decantación de los sólidos suspendidos en el agua.

Los tanques de Sedimentación secundaria dimensionados para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales tienen de un diámetro de **3,0 m** y una altura total de **2,5 m** cada uno. La altura útil es de **2,0 m**, la altura de los paneles de tasa alta es de 0,5 m y una profundidad de tolva de recolección de lodos de **0,6 m**.

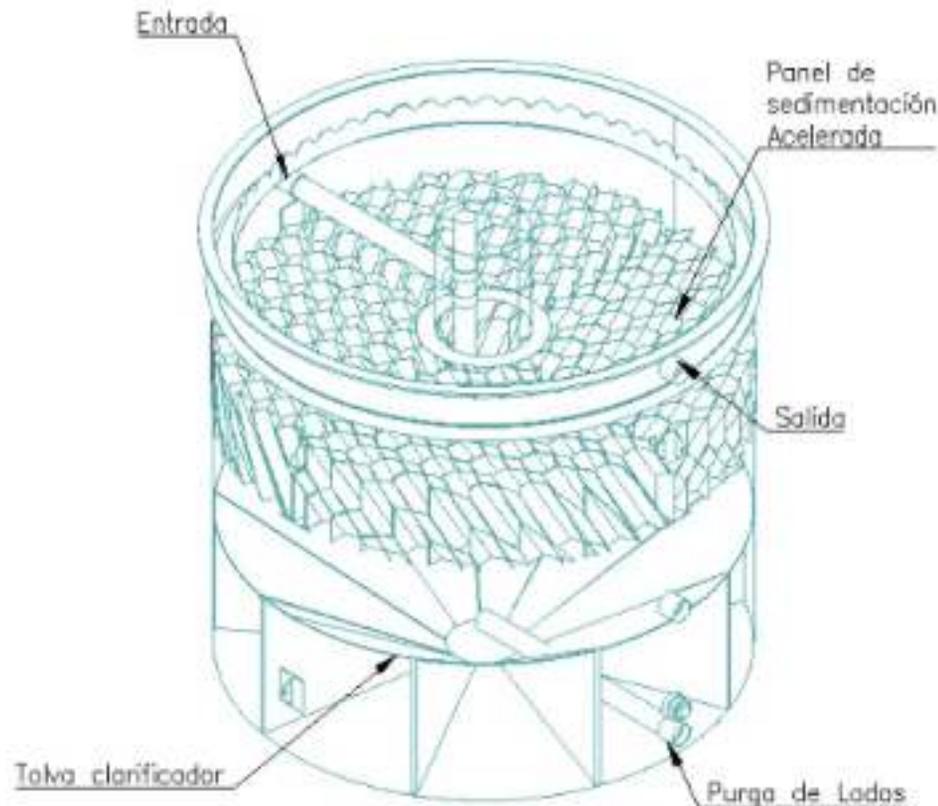


Figura 70: Modelo del Sedimentador Secundario con paneles de tasa alta.

Cada sedimentador se cuenta con un vertedero de rebose del agua clarificada y de una canaleta que conduce las aguas clarificadas hasta una tubería de conducción al Canal de salida y aforo, esta canaleta se dimensiona de **0,2 m** de ancho y **0,15 m**.

El efluente del sedimentador secundario posee las características requeridas para el cumplimiento de la Resolución 0631 de 2015 de vertimiento, en dicha unidad se produce un volumen de lodos debido a la decantación de los sólidos. Se producen en total  $0,14 \text{ m}^3$  de lodos al día, los cuales serán purgados diariamente a los lechos de secado para realizar el tratamiento de lodos generados dentro de la planta.

### 7.2.6. Canal de salida y aforo

El canal de salida es propuesto para realizar el control de caudal de salida al effluente y para la medición y aforo sobre las aguas tratadas que serán vertidas. El canal se plantea para el caudal de diseño de la planta (3,7 l/s). El canal se propone rectangular, diseñado en concreto de dimensiones de **0,50 m** de ancho y **0,50 m** de alto.

En el canal de salida se ubica una estructura tipo Canaleta Parshall para realizar medición de caudal de salida de la planta y toma de muestras de agua para la evaluación de calidad de vertimiento. La canaleta Parshall se selecciona con un ancho de garganta de **1 pulgada**, lo que permite la medición del caudal de funcionamiento normal de la PTAR (3,7 l/s). Las dimensiones de diseño y la tabla de altura de lámina en el punto de medición se encuentran en las memorias de cálculo de diseño de la PTAR anexas al informe de diseño.

En el sitio de salida de la planta espera una concentración de los parámetros fisicoquímicos del agua tratada que va a vertimiento mostrados en la Tabla 31 dando cumplimiento a las concentraciones requeridas para descarga en cuerpo de agua según la Resolución 0631 de 2015.

Tabla 31: Concentración de parámetros en el agua de salida de la planta.

Parámetro	Unidad	Límite máximo	Entrada	Salida
pH	unidades de pH	6 - 9	7,8	7 - 8
DQO	mg $O_2/L$	180	400	145,28
$DBO_5$	mg $O_2/L$	90	220	43,52
SST	mg/L	90	220	7,00
SSED	ml/L	5	10	0,50
Grasas y Aceites	mg/L	20	100	5,00

### 7.2.7. Estructura de descarga

A través de un alcantarillado se conducen las aguas tratadas desde el canal de salida hasta el punto de vertimiento. Se presenta adjunto al informe la memoria de cálculo de dicho alcantarillado de descarga con las especificaciones de diseño.

### 7.3. Tren de tratamiento de lodos

Un aspecto importante dentro de las plantas de tratamiento de aguas residuales es el relacionado con el tratamiento y disposición de lodos generados. Para esto se diseña un tratamiento de los lodos producidos por el reactor biológico, el tratamiento primario y secundario de las aguas residuales de la PTAR, de acuerdo a la producción de lodos y la frecuencia esperada, el proceso corresponde a deshidratación de lodos.

#### 7.3.1. Deshidratación de lodos

La deshidratación de los lodos provenientes de los sistemas de tratamiento se realiza mediante lechos de secado, donde se busca reducir el contenido de agua en el lodo a menos de un **10 %**. El volumen de lodos a deshidratar diariamente es de  $0,14\text{m}^3/\text{día}$ , dicho volumen se dispondrá en una celda de secado con un espesor de capa de lodo de **0,3 m**. Con estos requerimientos se dimensiona la celda de secado requerida siendo esta rectangular de ancho **2,0 m** y largo **2,0 m**, un esquema de estos se presenta en la Figura 71.

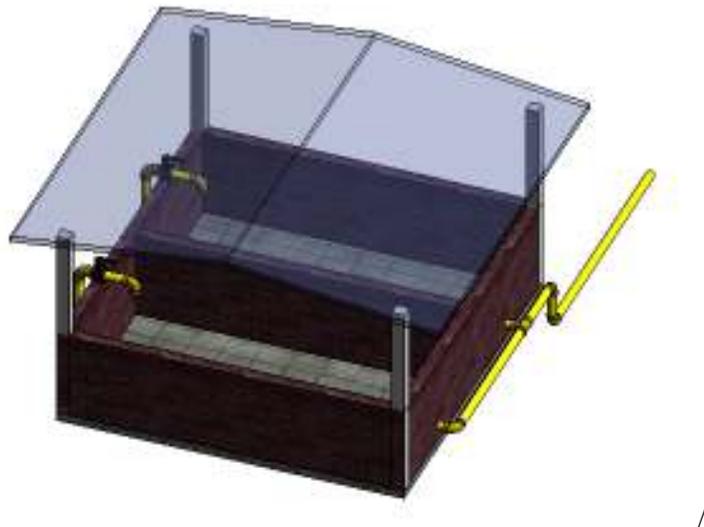


Figura 71: Esquema de los lechos de secado.

La entrada a los lechos se realiza mediante tubería que permite el paso de estos sin generación de obstrucción. El lecho filtrante está constituido por una capa superior de **0,1 m** de material de cobertura o ladrillo, luego una capa de arena gruesa de **0,3 m**, después se realiza una capa de grava de  $3/4''$  a  $1/2''$  de

**0,1 m** de espesor y luego una capa de grava más gruesa de 1" a 3/4" de **0,1 m** de espesor (Romero Rojas, 2004). Debajo de la estratificación planteada anteriormente se instalará la tubería de PVC perforada con orificios para evacuar las aguas filtradas por la red general de drenaje de la PTAR hacia la fuente receptora.

Los espesores de cada capa requerida en el diseño del lecho de secado se pueden evidenciar de mejor manera en la Figura 72.



Figura 72: Estratificación de la estructura del lecho de secado (medidas en metros).

El proceso de secado se realiza durante 7 días, donde se va disponiendo el lodo producido al día en un lecho de secado y a los 7 días se remueve deshidratado para su disposición final. Se propone el uso de 3 celdas de lechos de secado en la PTAR para una operación más controlada de deshidratación de los lodos, construidos en concreto reforzado, provistos de protección de la lluvia y con techo translúcido para aprovechar la radiación solar en el secado.

### 7.3.2. Disposición de biosólidos

La disposición final de los lodos secos o biosólidos se realiza mediante recolección semanal de estos por medio de los carros de transporte, su disposición queda a elección. Se recomienda el reúso de los biosólidos como compostaje para zonas verdes. Al día se producen 15,1 kg de biosólidos producto de la deshidratación de los lodos en los lechos de secado.

## 7.4. Componentes generales

Se presentan los componentes generales del diseño de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. Dichos componentes especifican las obras necesarias para el funcionamiento y adecuación normal de cualquier planta de tratamiento. La ubicación de dichos componentes en el lote propuesto se encuentra en el plano Layout entregado junto al informe de diseño. La ubicación de cada estructura se plantea para seguir un tren de tratamiento lógico dentro del área disponible y tener un control preciso de los procesos dentro de la PTAR. (Figura 73)

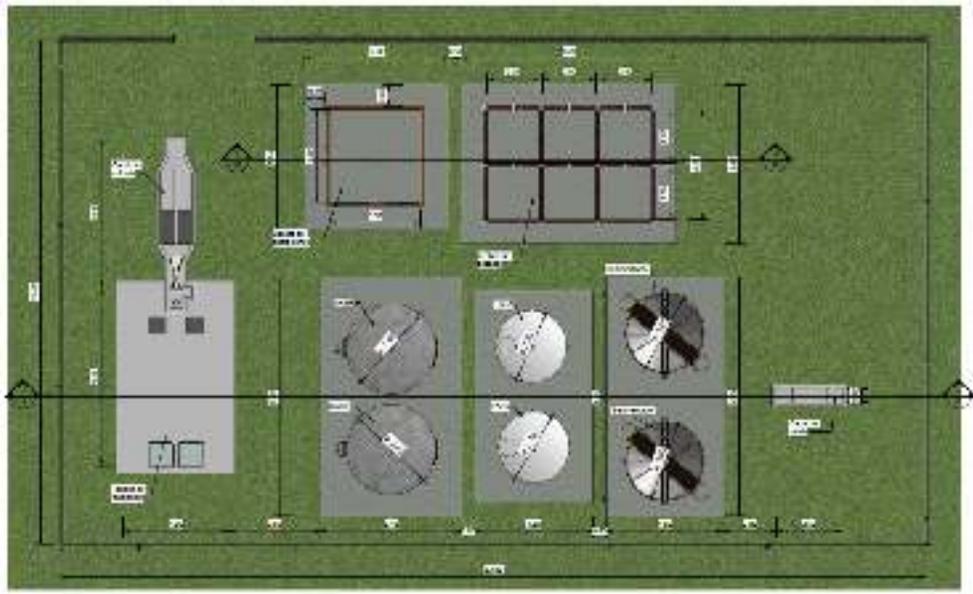


Figura 73: Vista en planta de la distribución propuesta en la PTAR.

El proyecto de la PTAR presenta una distribución y diseño compacto que busca ocupar el menor espacio posible dentro del lote dispuesto, dejando andenes y espacios de tránsito donde se pueden movilizar peatones. La PTAR cuenta con componentes generales tales como acceso a la planta, andenes para circulación y una caseta de operación.

### 7.4.1. Caseta de operación

Construcción civil donde se realiza la operación general de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. En el edificio de operaciones se controlan los equipos electromecánicos y se realizan tomas de muestra del agua servida y tratada, así como la verificación del correcto funcionamiento de cada una de las

partes del tren de tratamiento. Esta debe contar con las áreas adecuadas para realizar un seguimiento y operación de todas las variables de funcionamiento, las cuales corresponden a:

- Cuarto de herramientas
- Área de tablero de control eléctrico
- Laboratorio
- Servicios sanitarios
- Oficina de control

La caseta debe contar con unas dimensiones mínimas de 3,80 m x 3,50 m y una altura de 2,40 m, adicionalmente debe contar con buena iluminación y ventilación, así como con el servicio de energía eléctrica y abasto de agua tratada.

#### **7.4.2. Vías y andenes dentro de la planta**

Dentro de la PTAR no se plantean vías pavimentadas ya que no se hace necesario el ingreso de vehículos pesados, sin embargo se recomienda el diseño de andenes para tránsito de personal de operación y mantenimiento de los procesos requeridos dentro de la planta, así como la remoción de biosólidos producidos en la deshidratación de lodos en lechos de secado.

#### **7.4.3. Alternativas de ubicación PTAR**

Contemplando la tecnología de implementación de tratamiento biológico de la PTAR propuesta se hacen necesarios ciertos requerimientos a cumplir con base en la normatividad actual (Ministerio de Vivienda, 2017) de distancias mínimas de ubicación de dicha planta de tratamiento; además, se contempla la densidad y el desarrollo del espacio territorial que puede contemplar en la etapa de diseños arquitectónicos un cambio de lugar y para tal caso se evalúan y proponen zonas recomendadas para la ubicación de la PTAR siguiendo los lineamientos en base a la resolución 0330 de 2017, donde se tiene una cota apta para el flujo a gravedad del sistema de alcantarillado, respetando el retiro de 200 m a centros poblados y contemplando los resultados de amenaza por inundación, avenidas torrenciales o movimientos en masa en el predio, se presenta en la Figura 74 con las posibles zona de reubicación en caso que así se requiera.

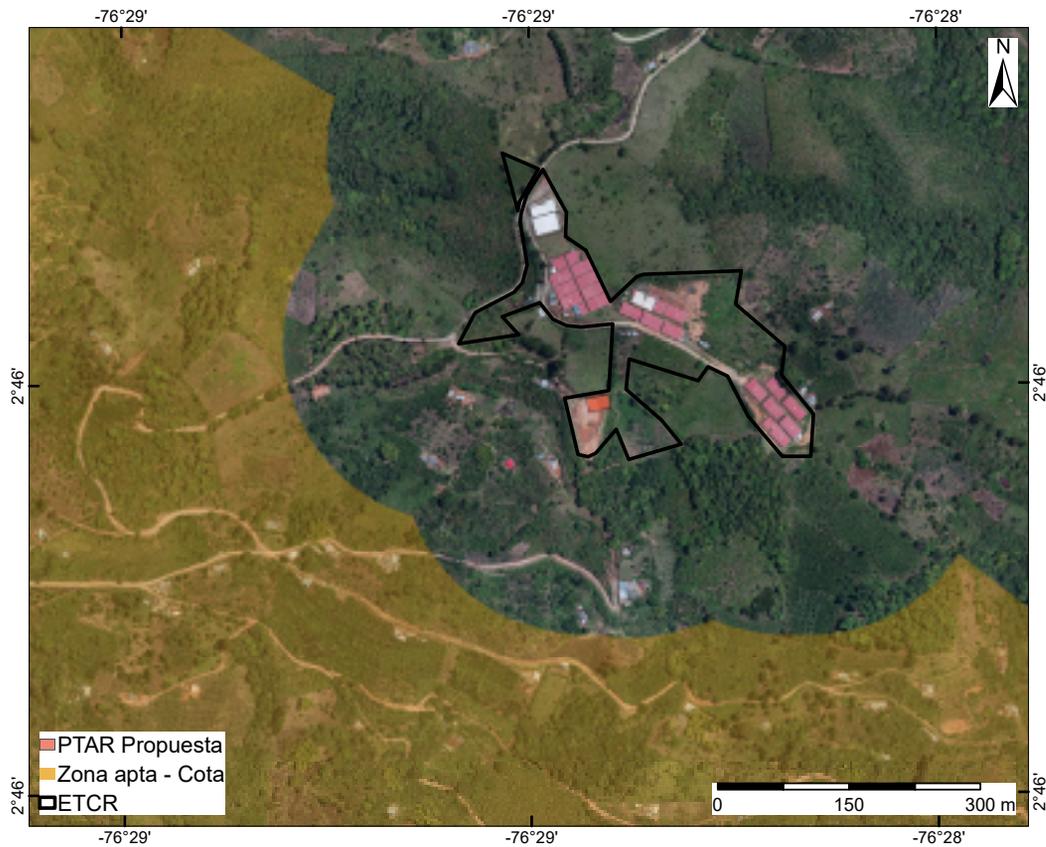


Figura 74: Alternativas de ubicación adicional para PTAR

Con base en esta recomendación se debe tener en cuenta los siguientes requerimientos al momento de implementar la ubicación de la PTAR:

- Usos del suelo permitidos o restringidos por el plan de ordenamiento territorial o por el esquema de ordenamiento territorial.
- Verificación de velocidad y dirección del viento.
- Requerimientos de área para la demanda actual y futura.
- No se permite la localización de una PTAR cerca de hábitats especiales como humedales naturales, o ecosistemas ambientalmente críticos, sensibles, de importancia ambiental o de importancia social, a la luz de lo definido en el Decreto 1753 de 1994, o el que lo modifique o reemplace.
- No se deben localizar en el área de influencia del cono de aproximación de las aeronaves a los aeropuertos, por riesgo de interferencia con aves.
- En los casos en que se considere necesario, se debe evaluar la presencia de recursos culturales, históricos o arqueológicos del sitio.

- Identificación del punto de descarga a la fuente receptora.
- Escogencia de la zona de la PTAR que implique un balance favorable entre excavaciones y rellenos.
- Distancia mínima de localización de la PTAR de 200 m a centros poblados para la tecnología escogida.
- Se deben realizar las perforaciones requeridas para la elaboración del estudio de suelos para la implantación de las obras estructurales requeridas en el diseño de la PTAR.

## 7.5. Cálculo AU

El presente anexo tiene como objetivo calcular los costos indirectos de la construcción del proyecto, los cuales están asociados a los gastos por dedicación salarial del personal administrativo, gastos operacionales e insumos, así como impuestos y garantías contractuales y por último la utilidad esperada por el contratista en la ejecución de las obras.

El proyecto de los sistemas de tratamiento y componentes de acueducto y alcantarillado para los ETCRS hace parte del proyecto global de adecuar zonas para dotar de todas las facilidades habitacionales como vivienda, vías, servicios públicos entre otras, por lo que la construcción se debe realizar de paralelamente con las del objeto del diseño, lo que puede simplificar costos operacionales y salariales debido a la simultaneidad, por lo anterior se listan los siguientes componentes de cálculo en la matriz del Factor AU.

Para el proyecto del ETCRS Los Monos el cálculo del AU para PTAP y componentes asociados es de 22 %, y para PTAR de 26 %.

## 7.6. Ajuste Población

Luego de finalizado el diseño de los sistemas de tratamiento de los ETCRS, fue necesario realizar un ajuste poblacional debido a la dinámica el cual presentó una disminución de la población de diseño, representando disminuciones o variaciones cercanas o aproximadas al 50 %, el sistema diseñado cuenta con dos líneas de tratamiento biológico con unidades modulares en poliéster reforzado en fibra de vidrio para flexibilidad de la operación, para llevar el ajuste a cantidades y ajuste de presupuestos se propone separar dichas líneas de tratamiento para poder disminuir por fases y tener precisión sobre el sistema requerido.

La población ajustada para el ETCRS Los Monos es de 984 habitantes, con una disminución respecto al diseño inicial de 51 %.

# Referencias

- Ministerio de Vivienda, C. y. T. (2017). *Resolucion 0330 de 2017, 08 de junio, por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico (ras) y se derogan las resoluciones números 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009.* Autor.
- Ministerio de Vivienda, C. y. T. (2018). *Resolucion 0844 de 2018, 08 de noviembre, por la cual se establecen los requisitos técnicos para los proyectos de agua y saneamiento básico de zonas rurales que se adelantan bajo los esquemas diferenciales definidos en el capítulo 1, del título 7, de la parte 3, del libro 2 del decreto 1077 de 2015.* Autor.
- Romero Rojas, J. A. (2004). *Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño.* Bogotá, CO, *Escuela Colombiana de Ingenieros.*

## Parte III

# Viabilidad por Amenaza *Estudios Básicos de Amenaza*

## Capítulo 8

# Amenaza por Movimientos en masa

### Introducción

Los movimientos en masa corresponden a todo movimiento de una masa de roca, detritos o tierra por efectos de la gravedad (Cruden, 1991). Existe una gran variedad de fenómenos de remoción en masa gravitatorios clasificados en términos del material (suelo, detritos y roca) y tipo de movimiento (caída, volcamiento, propagación lateral, deslizamiento y flujo) descritos por Cruden y Varnes (1996).

En términos de amenaza, la definición adoptada por la Organización para la Ayuda en caso de Desastres de las Naciones Unidas (UNDRO, por sus siglas en inglés) para cualquier tipo de amenaza de origen natural, y que puede ser aplicada para el caso de los movimientos en masa, es la dada por Varnes & IAEG (1984) como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino dentro de un periodo de tiempo específico y dentro de un área dada.

La probabilidad espacial ( $P_s$ ) se obtiene de la evaluación de la susceptibilidad y la probabilidad temporal ( $P_t$ ) se obtiene a partir del análisis del factor detonante, lluvia o sismo para el presente estudio. Las metodologías disponibles en el estado del arte difieren su aproximación de acuerdo con el factor detonante, razón por la cual se abordan dos procedimientos diferentes en el presente estudio.

Finalmente es importante resaltar que para la definición del procedimiento metodológico se debe establecer inicialmente el área de estudio, los estudios previos y el inventario de movimientos en masa y proceso morfodinámicos.

## 8.1. Marco normativo de gestión del riesgo

La incorporación de la prevención y la reducción de riesgos en la planificación del desarrollo territorial se vienen abordando desde la entrada en vigencia de la Ley 9 de 1989, donde se dispuso por primera vez, la obligatoriedad de incluir en los planes de desarrollo, acciones concretas para la intervención del territorio. Según esta ley, los municipios deben levantar y actualizar los inventarios de zonas que presenten alto riesgo para la localización de asentamientos humanos. De igual manera, por medio de la Ley 46 de 1989 y el Decreto 919 de 1989, que organizó el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, se dispuso que las entidades territoriales deben incorporar el componente de prevención de desastres en los procesos de planificación territorial, sectorial y de desarrollo.

Posteriormente, la Constitución Política de Colombia, en el Artículo 311 y la Ley 152 de 1994 en su artículo 41, ordenan que los municipios deben contar con un Plan de Ordenamiento Territorial (POT). Sin embargo, es con la Ley 388 de 1997 que se definen las bases legales para la aplicación del ordenamiento territorial, que busca una disposición ordenada de los habitantes, las actividades y la infraestructura en el territorio.

Entre las disposiciones de la Ley 388 de 1997 se establece que los POT deben definir las políticas, directrices y regulaciones sobre prevención de amenazas y riesgos naturales, el señalamiento y localización de las áreas de riesgo para asentamientos humanos, así como las estrategias de manejo de zonas expuestas a amenazas y riesgos naturales; tema que es retomado en el Decreto 19 de 2012, en su Artículo 189, donde se indica que la revisión de mediano y largo plazo de los POT o la expedición de un nuevo plan, podrá tener lugar hasta que se garantice la delimitación y zonificación de las áreas de amenaza y se delimiten las áreas con condición de riesgo, además de definir las medidas para su mitigación .

La Ley 1523 de 2012, que sustituye el Decreto Ley 919 de 1989 y reestructura el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, establece que los POT deben integrar el análisis de riesgo en el diagnóstico biofísico, económico y socioambiental, considerando el riesgo de desastres como un condicionante para el uso y la ocupación del territorio, procurando evitar la configuración de nuevas condiciones de riesgo.

Como herramientas adicionales la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), soportada en el Artículo 32 de la Ley 1523 de 2012,

establece el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD), la Estrategia Municipal para la Respuesta a Emergencias (EMRE) y el Sistema de Comando de Incidentes (SCI), como instrumentos que deben estar articulados a los POT, los cuales han de ser validados y actualizados periódicamente para abarcar armoniosamente las transformaciones que sucedan en el territorio.

El Decreto 019 de 2012 determina que el Gobierno Nacional deberá reglamentar las condiciones y escalas de detalle para la delimitación y zonificación de las áreas de amenaza y con condición de riesgo. Reglamentación que se realiza a través del Decreto 1807 de 2014 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los POT, y se compila en el Decreto 1077 de 2015. En dichos decretos se establece que los Estudios Básicos de Amenaza se deben realizar para la revisión de los contenidos de mediano y largo plazo de POT o la expedición de un nuevo plan. La norma establece que el alcalde municipal no puede someter a consideración de las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) los proyectos de revisión de los POT sin el cumplimiento de este requisito.

Como contenido los Estudios Básicos de Amenaza deben presentar:

- La delimitación y zonificación de las áreas de amenaza
- La delimitación y zonificación de las áreas con condición de amenaza (ACA)
- La delimitación y zonificación de las áreas con condición de riesgo (ACR)
- La determinación de las medidas de intervención, orientadas a establecer restricciones y condicionamientos mediante la determinación de normas urbanísticas.

Las áreas con condición de amenaza son aquellas áreas zonificadas como de amenaza alta y media en los Estudios Básicos, que están sin ocupar en el suelo urbano, de expansión urbana, rural suburbano o centros poblados rurales en las que en la revisión o en la expedición de un nuevo POT se proponga su desarrollo. Este desarrollo está sujeto a los resultados de los estudios de detalle, que hacen parte de la ejecución de los planes de ordenamiento.

Las áreas con condición de riesgo son aquellas áreas zonificadas como amenaza alta en los Estudios Básicos donde se encuentran elementos expuestos (áreas urbanizadas, ocupadas o edificadas, líneas vitales y edificaciones indispensables); y las zonas definidas como amenaza media, para las cuales se propone en la revisión o expedición del nuevo POT un cambio de densidad o un cambio en los usos del suelo, que pueda generar o incrementar el riesgo en la zona.

Como elemento fundamental de la inclusión de los Estudios Básicos de Amenaza en la formulación del POT se destaca la priorización de las ACA y ACR que requieren Estudios Detallados. Esta priorización de Estudios Detallados en las ACA y ACR deben ser incluida en el programa de ejecución del POT con la programación de actividades, las entidades responsables, y los recursos respectivos de los estudios que se ejecutarán en el periodo del alcalde que adelanta la revisión del POT o la expedición de uno nuevo.

## 8.2. Estudios previos

Se realiza la búsqueda y análisis de información secundaria de estudios sobre movimientos en masa para susceptibilidad y amenaza en el área de estudio teniendo en cuenta la disponibilidad y calidad de la información, se encontraron dos fuentes importantes de mapas.

- Memoria explicativa de la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 Plancha 343 – Silvia (SGC y UIS, 2014). La clasificación para generar los mapas de susceptibilidad por movimientos en masa en la plancha 343 arroja 5 categorías distintas (Muy Alta, Alta, Media, Baja y Muy Baja), reslatando para el municipio de Caldono y municipios vecinos una susceptibilidad alta, caracterizado por zonas con altas pendientes y ambientes denudacionales y estructurales con altos procesos de erosión y meteorización. El rango de susceptibilidad alta cubre el 52,4 % del área total de la Plancha 343. En cuanto a la amenaza relativa para la plancha 343 se establecieron 4 categorías de amenaza (Muy Alta, Alta, Media y Baja). La amenaza alta tiene la mayor cobertura y se localiza a lo largo de la Cordillera Central, estando de manera heterogénea a lo largo de los municipios de Caldono, Jambalo, entre otros. La amenaza alta representa la segunda categoría más representativa y se caracteriza por altos procesos de erosión y meteorización desarrollando procesos morfodinámicos como deslizamientos traslacionales junto a reptación, caída de roca y detritos, además de flujos de detritos.
- Plan básico de ordenamiento territorial municipio (PBOT) de Caldono (Caldono, 2005). En la información obtenida para la amenaza por movimientos en masa en el municipio se obtuvo que la gran mayoría de este se encuentra en grado medio, y en menor área de influencia los grados alto y bajo respectivamente, el grado de amenaza se alta se presenta por

los periodos lluviosos originados en el municipio, y la gravedad que afecta principalmente la zona de las laderas.

- Consejo municipal para la gestión del riesgo de desastres – CMGRD- Caldono, Cauca. (CMGRD, 2017). Este documento constituye uno de los instrumentos fundamentales para orientar la Gestión del Riesgo del municipio de Caldono, con base en lo anterior, se prioriza, formula, y se hace seguimiento a las acciones realizadas en el marco de los procesos de conocimiento, reducción del riesgo y manejo de desastres en acorde con lo estipulado en la Política Nacional de Gestión del Riesgo (PNGRD), contribuyendo al desarrollo sostenible del municipio. En el tema específico de movimientos en masa para el municipio de Caldono se tiene que el grado de amenaza varía de media a alta, esto en gran parte a su posición geografica sobre la Cordillera Central y por muchos factores de origen natural, entre los que se destacan la actividad sísmica, la zona de influencia de la Falla Romeral, los deslizamientos que se presentan a causa de inviernos fuertes y prolongados y por la misma inestabilidad del suelo producto de la erosión.

### **8.3. Definición del área de influencia para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa**

Para la elaboración de los estudios básicos de amenaza por movimientos en masa inicialmente se procedió a definir un área de influencia mayor de comportamiento geomecánico independiente y que enmarcara el predio del antiguo espacio territorial Los Monos. Sobre esta área su estabilidad no depende del comportamiento de las zonas vecinas, y a su vez la morfodinámica interna del área establecida no afecta la estabilidad de las áreas vecinas. Este concepto, propuesto por Chica (1989), permite tener un acercamiento regional al área de interés, lo cual apunta en la misma dirección de los estudios básicos de amenaza.

Los límites de esta unidad básica de estudio es establecida inicialmente utilizando los cambios definitivos de pendiente, tales como cuchillas y drenajes. Está área es posteriormente ajustada considerando las unidades geológicas superficiales y estructuras. La Figura 75 presenta el área de influencia por movimientos en masa para el antiguo espacio territorial Los Monos.

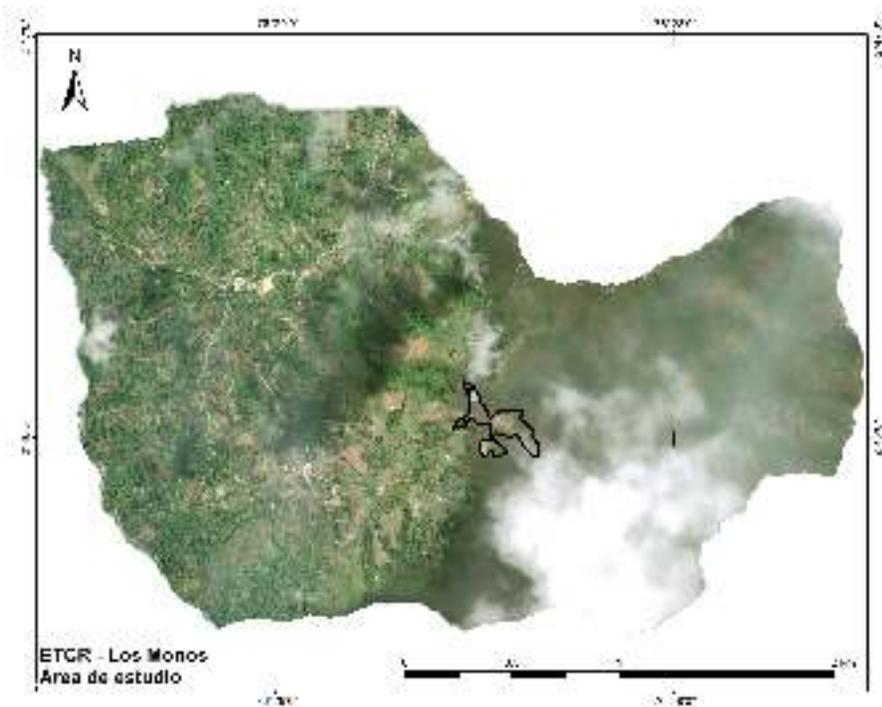


Figura 75: Localización del área de estudio del antiguo ETCR Los Monos

## 8.4. Elaboración del inventario de movimientos en masa

Para la elaboración del inventario de movimientos en masa, y considerando la información disponible, se utilizaron dos técnicas: (i) inventario histórico, (ii) fotoanálisis. A continuación se describe cada uno de los procedimientos desarrollados y los resultados obtenidos.

### 8.4.1. Catálogo histórico de eventos

La realización del inventario histórico de movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones, toma como base de datos los registros disponibles para el municipio de Caldonio en las plataformas del Sistema de Inventario de Desastres (DesInventar) y el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA), con el fin de dar una mirada en la morfodinámica regional asociada al antiguo ETCR Los Monos. Se crea una sección del catálogo histórico de eventos, de acuerdo al fenómeno estudiado en cada capítulo: Capítulo 8 - Movimientos en masa, Capítulo 10 - Avenidas torrenciales y Capítulo 9 - Inundaciones.

El DesInventar (<http://www.desinventar.org/>) es una herramienta de software que permite la compilación, sistematización, organización y visualización de los desastres históricos y el análisis de estos desde un punto de vista espacial

y temporal. La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres -LA RED-, la corporación Observatorio Sismológico del Suroccidente Colombiano (OSSO) y La Oficina de la Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR) iniciaron este proyecto a finales de 1993 con el fin de proveer a los diversos actores en actividades de prevención y mitigación de desastres de mejores capacidades para el acopio, procesamiento, análisis y representación homogénea de los desastres (OSSO y La RED, 2009). Actualmente la plataforma cuenta con catálogos de 30 países entre los que se encuentra el inventario histórico nacional de desastres de Colombia con información desde el año 1914.

Por su parte el SIMMA es un sistema de información dinámico desarrollado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) que registra, almacena, administra, procesa y visualiza la ocurrencia histórica de movimientos en masa en forma de inventario y catálogo así como estudios de zonificación (SGC, 2015).

Durante el periodo comprendido entre 1984 y el primer trimestre del año 2017, el municipio de Caldono registró en el catálogo del DesInventar 22 eventos clasificados como movimientos en masa, los cuales representan el evento de mayor frecuencia con un porcentaje de 78,6 % de los reportes (teniendo en cuenta solo eventos tipo movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales). Se ocurrencia se da principalmente a lo largo de vías de la región, afectando a más de 4000 personas. Así mismo en el catálogo del SIMMA se registran 19 eventos de movimientos en masa durante el periodo comprendido entre 1984 y el primer trimestre del año 2017. La Figura 76 representa la distribución espacial de los registros en este último catálogo, donde ninguno de ellos se localiza dentro del polígono de influencia del antiguo ETCR.

El Plan Municipal para la Gestión de Riesgos de Desastres (CMGRD, 2014) señala la vereda Los Monos como un escenario de riesgo asociado con fenómenos de origen geológico, como movimientos en masa, asociado al tipo de suelo, la influencia del sistema de fallas Cauca Romeral y los veranos e inviernos fuertes y prolongados. De igual forma, estos eventos dan lugar a procesos erosivos que han afectado viviendas, cultivos, producción, vías e infraestructura colectiva.

Según los reportes de los 42 municipios del Departamento del Cauca se presentaron a lo largo del departamento eventos por movimientos en masa, sismos, avenidas torrenciales, inundaciones, incendios forestales y estructurales, vendavales, entre otros. Sin embargo los movimientos en masa son uno de los eventos que mayor amenaza representa para la población, por esta razón están priorizados. Generalmente se presenta en épocas del año de mayor precipita-

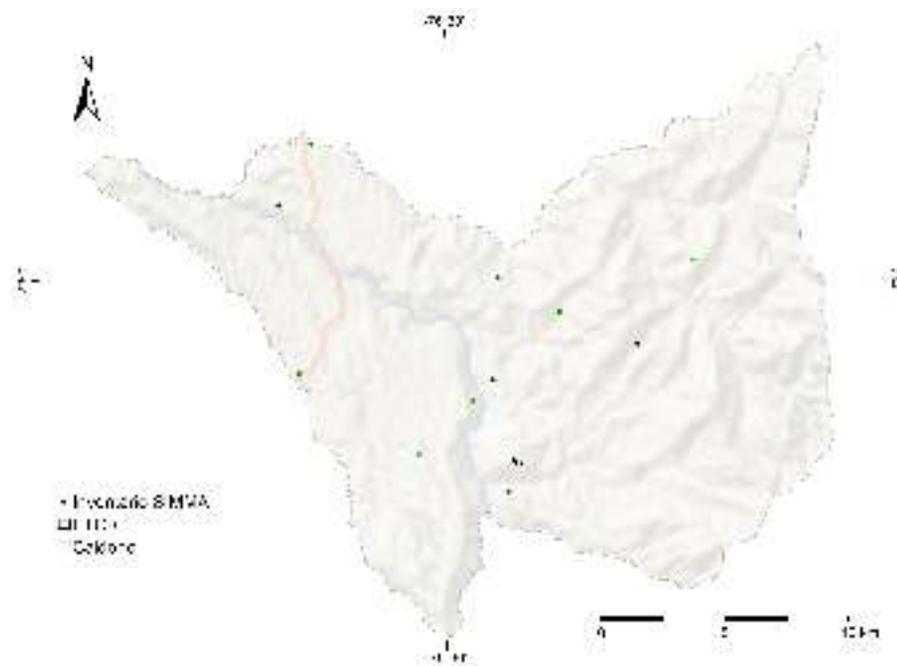


Figura 76: Distribución espacial de movimientos en masa en el municipio de Caldono registrados en el catálogo SIMMA

ción que sumado a las condiciones geográficas del Municipio, las condiciones socioeconómicas y veranos prolongados, han generado afectaciones a viviendas, cultivos, producción, vías e infraestructura colectiva.

A nivel del Municipio de Caldono no existen registros de ocurrencia de sismos. El municipio de Caldono presenta un grado de amenaza relativo por sismicidad (CRC, 2005).

#### 8.4.2. Procesos morfodinámicos

El levantamiento del inventario de procesos morfodinámicos brinda información sobre la ubicación espacial de los procesos y representa uno de los insumos en la caracterización de las condiciones geoambientales asociados a la ocurrencia de movimientos en masa.

El SGC en su Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25.000 (SGC, 2017a), califica a la capa con el inventario de procesos morfodinámicos como I (importante) y a la actividad de movimientos en masa como VI (muy importante), en la zonificación de amenaza por movimientos en masa.

La elaboración de este inventario utiliza como insumos, el Modelo Digital de Elevación a partir de imágenes de radar con resolución espacial 12,5m x

12,5m de la plataforma *ALOS PALSAR*, la capa raster con información de las pendientes y las imágenes satelitales de proveedores como *Google* (imágenes del año 2011 y 2018) y *ESRI* (imágenes desde el año 2016 hasta el año 2019), a través de las plataformas *Google Earth* y *World Imagery* respectivamente. El proceso de fotoanálisis está enfocado en delimitar los procesos morfodinámicos presentes en el área de estudio. Se identifican movimientos en masa clasificándolos en activos e inactivos, así mismo se identifican depósitos aluviales (Figura 77) considerados como sedimentos disponibles y que pueden complementar el mapa de unidades geológicas superficiales para la zona.

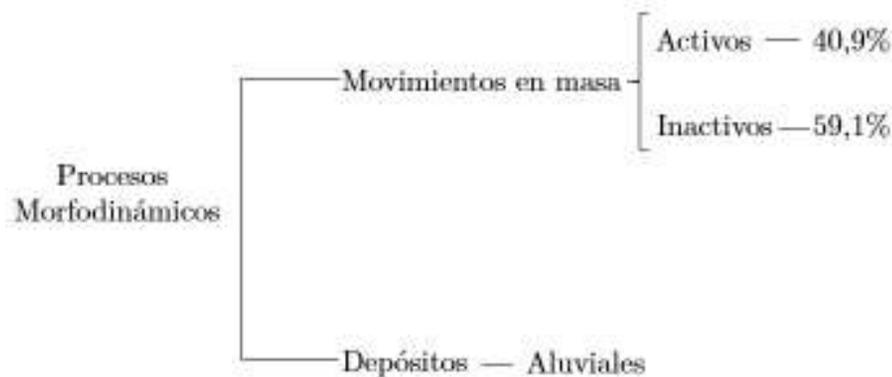


Figura 77: Clasificación utilizada en la identificación de procesos morfodinámicos

En la Figura 78 se presentan los elementos asociados a los procesos morfodinámicos que se capturan durante el proceso del fotoanálisis.

En el área de la zona se identifican 22 movimientos en masa, 13 inactivos (59,1 %) y 9 activos (40,9 %) (Figura 77). Los movimientos en masa se concentran hacia la parte sur de la zona. En relación a los depósitos identificados, todos corresponden a tipo aluvial presentes en el río Ovejas, el cual marca el límite oeste y noroeste del área de estudio. Debido a la presencia de nubes, no fue posible realizar el fotoanálisis en algunas zonas del área de estudio.

### 8.5. Evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa

La susceptibilidad es el primer acercamiento a la evaluación de amenaza, dado que zonifica el terreno de acuerdo a la posibilidad de que una ladera falle. La susceptibilidad por movimientos en masa se define como la probabilidad de la ocurrencia en un área específica de acuerdo con las condiciones intrínsecas de terreno, donde factores detonantes (precipitación o sismo) no son considerados en su análisis (Brabb, 1985; Soeters y Van Westen, 1996).

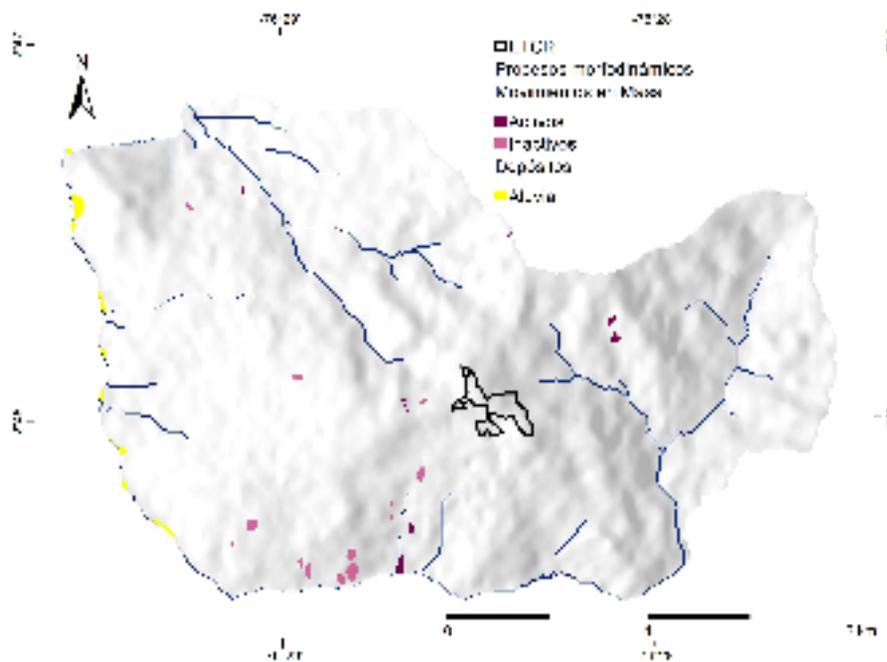


Figura 78: Inventario procesos morfodinámicos Los Monos - Zona C

De acuerdo con la información disponible y la búsqueda de bases de datos y fotoanálisis no se logró obtener un inventario de movimientos en masa lo suficientemente robusto que permita implementar en el área de estudio un método estadístico bivariado, como Peso de la Evidencia recomendado por la Guía del SGC, o multivariado como regresión logística, ampliamente utilizado en el mundo. Por lo tanto, y cumpliendo con lo estipulado en el Decreto 1977 de 2015 para suelos rurales a escala 1:25.000 se optó por utilizar un método heurístico, los cuales a estas escalas regionales presentan un buen desempeño. El resultado será clasificado en cinco categorías correspondientes a muy baja, baja, media, alta y muy alta ampliamente utilizada en el mundo y especialmente por el Servicio Geológico Colombiano en metodologías Heurísticas.

De esta forma, se propone combinar dos métodos heurísticos, Análisis Jerárquico de Procesos (*AHP*) (Saaty, 1980) para asignar peso a las variables, y asignación directa por criterio de experto para asignar peso a las clases que conforman las variables.

### 8.5.1. Unidad de análisis y área mínima cartografiable

La unidad de análisis se define como una porción de terreno que contiene un conjunto de condiciones que difieren de la unidad adyacente a lo largo de límites diferenciados (Hansen, 1984). Las más utilizadas por su facilidad bajo SIG son

las mallas de celdas regulares tipo raster (Carrara, 1983) sin embargo, existen la Unidad de Terreno (Hansen, Franks, Kirk, Brimicombe, y Tung, 1995), Unidad de Laderas (Carrara y cols., 1991), y Unidad de Condiciones Únicas (UCU) (Bonham-Carter, 1944)

Para el estudio de la susceptibilidad en suelo rural se define como unidad de análisis las mallas de celdas regulares tipo raster con resolución espacial de 12,5 m x 12,5 m, ya que permiten su uso bajo SIG en extensas áreas de territorio, incluyendo la variabilidad espacial de las variables temáticas a utilizar.

El área mínima cartografiable es fundamental ya que determina el nivel de detalle de los resultados finales. Para su determinación se consideró la escala exigida por el Decreto 1077 de 2015 para suelos rurales, 1:25.000, la cual es acorde a la resolución espacial (12,5 m x 12,5 m) de los modelos digitales utilizados de ALOS PALSAR. El SGC 2017a para suelos rurales recomienda 4 mm x 4 mm, lo cual para este caso equivaldría a un área de 64 píxeles, es decir  $10.000 m^2$ . Considerando que la mayoría de las variables se derivaron del MDE e imágenes satelitales se procedió a utilizar áreas de 2 mm x 2 mm, que equivalen a 16 píxeles y a  $2.500 m^2$  a la escala de trabajo; a excepción de mapa geológico, el cual fue construido a partir de la plancha del SGC 1:100.000 y detallado en trabajo de campo intensivo con énfasis en formaciones superficiales, tales como suelos derivados y depósitos cuaternarios. Sin embargo no es posible alcanzar en los tiempos estimados un nivel tal de detalle para el mapa geológico.

Se resalta que la unidad mínima cartografiable fue establecida solo al final del procedimiento sobre los mapas de susceptibilidad, de tal forma que no se sumaran los ajustes realizados a cada variable.

### **8.5.2. Variables predictoras**

Para la exploración de variables predictoras de la ocurrencia de movimientos en masa se utilizaron diferentes trabajos que compilan el estado del arte (Reichenbach, Rossi, Malamud, Mihir, y Guzzetti, 2018; SGC, 2017a; van Westen, Castellanos, y Kuriakose, 2008). A continuación se enumeran las diferentes variables continuas y categóricas consideradas en el análisis:

#### **8.5.2.1. Inclinação de la ladera (IL)**

relacionada con el tipo de material que conforma la unidad morfológica y con la susceptibilidad de dicha unidad a la ocurrencia de movimientos en masa (SGC, 2013).

### 8.5.2.2. Pendiente (S)

es el ángulo existente entre la superficie del terreno y un plano horizontal. Se relaciona con los movimientos en masa donde a mayor grado de pendiente aumenta la susceptibilidad a los movimientos en masa, pero para valores muy altos la susceptibilidad se reduce (SGC, 2013).

### 8.5.2.3. Relieve relativo (RR)

se define como la diferencia entre la mayor elevación y la menor elevación por unidad de área y se expresa como la máxima diferencia de altura del terreno por metros (SGC, 2013).

### 8.5.2.4. Rugosidad (Rug)

representa la desviación del vector normal a la superficie en cada celda, expresando así la complejidad y ondulación del terreno (Dai, Lee, Li, y Xu, 2001; Olaya, Hengl, y Reuter, 2009). En términos de amenaza se relaciona con los movimientos en masa de manera que las laderas de rugosidad alta son más propensas a presentar deslizamientos, debido a que los cambios sucesivos de pendiente favorecen una mayor infiltración del agua en el terreno y su inestabilidad (Londono, 2006).

### 8.5.2.5. Índice de humedad topográfica (TWI)

describe la tendencia de un sitio a saturarse dada su área contribuyente y las características de la pendiente local Gruber y Peckham (2009). Se obtuvo con el software Whitebox GAT y la herramienta *Wetness Index*, cumpliendo la ecuación:

$$Wi = Ln \frac{As}{\tan(slope)} \quad (8.1)$$

Donde  $As$  es el mapa raster de acumulación de flujo y  $emphSlope$  es el raster de pendiente en grados, generado a partir del modelo de elevación corregido.

### 8.5.2.6. Índice de posición topográfica (TPI)

evalúa cada celda con respecto a la posición relativa del cauce, dando la diferencia entre un valor de elevación de celda y la elevación promedio del vecindario alrededor de esa celda (Moore, Grayson, y Ladson, 1991).

### 8.5.2.7. Elevación relativa al cauce (EAS)

calcula la elevación de cada celda de la cuadrícula en un ráster por encima de la celda de flujo más cercana, medida a lo largo de la trayectoria de flujo descendente.

### 8.5.2.8. Distancia al drenaje siguiendo la pendiente (DDS)

: indica la longitud de cada pixel con respecto al cauce siguiendo la topografía. Se calcula con el software Whitebox GAT 3.4 y la herramienta *Downslope Distance to Stream*.

### 8.5.2.9. Distancia a Fallas (DF)

esta variable es analizada a partir de las fallas reportadas en las planchas geológicas de la zona. Es aceptado que el grado de actividad es proporcional al fracturamiento de los materiales y por lo tanto el grado de susceptibilidad es mayor, y decrece al alejarse del eje de la estructura.

### 8.5.2.10. Geología Superficial (Gs)

Esta variable hace referencia a las unidades geológicas superficiales, las cuales controlan los parámetros de resistencia de los materiales.

### 8.5.2.11. Evolución de las coberturas(Ec)

Esta variable hace referencia al cambio que han sufrido las coberturas en la cuenca a través de los años. En general se considera que áreas con coberturas boscosas presentan menor susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa. Diversos trabajos recomiendan utilizar mas que el tipo de cobertura el cambio de la cobertura.

### 8.5.2.12. Cinemático (Cin)

El mapa cinemático corresponde a la relación del aspecto y ángulo de inclinación de la ladera con las estructuras dominantes de la roca o conservadas en los perfiles de suelo.

### 8.5.2.13. Curvatura total (Cu)

La curvatura determina el grado de convexidad o concavidad de la superficie en la dirección de la pendiente (vertical) o transversal (horizontal). En el

presente estudio se combinaron ambas concavidades y se obtuvo un mapa de curvatura total definiendo geoformas de acuerdo con su curvatura vertical y horizontal.

### 8.5.3. Selección de variables y estimación de pesos por AHP

Para la selección del grupo de variables mejor predictoras para las condiciones locales se realizó la correlación entre las variables. La cual es una correlación binaria que permite evaluar la relación entre dos variables continuas asignando un valor entre -1 y 1, donde cero indica la no correlación de una variable con la otra, y -1 o 1, total correlación. La Figura 79 muestra los resultados para el area donde se resaltan las variables EAS, DDS, IL, S, DF y RR, quienes muestran relaciones con valores superiores a 0,5, con tonalidades de rojizas a vinotintas, que evidencian una alta correlación y por ello se deba tomar solo una del par comparado.

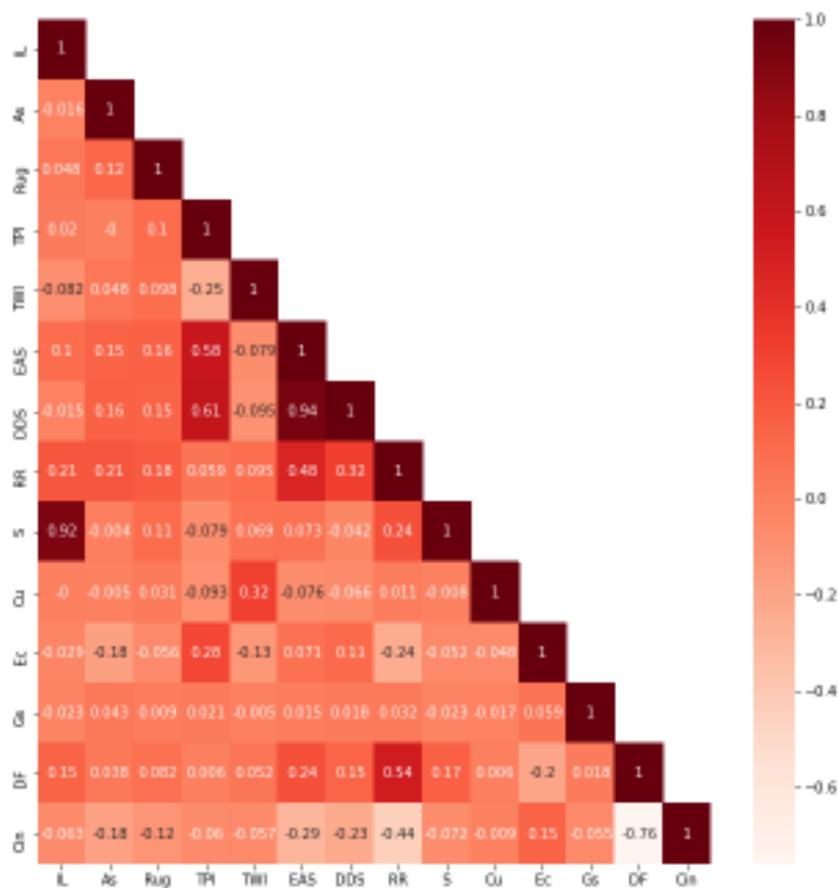


Figura 79: Matriz de correlación

De acuerdo con la correlación, las variables con mayor capacidad de discri-

minar entre la ocurrencia y no ocurrencia de movimientos en masa son:

- Geología superficial (Gs)
- Evolución de las cobertura (Ec)
- Curvatura (Cu)
- Pendiente (S)
- Índice de Humedad topografico (TWI)
- Mapa Cinemático (Cin)
- Relieve Relativo (RR)
- Elevacion relativa al drenaje mas cercano (EAS)
- Índice distancia a fallas (DF)

Con estas variables seleccionadas se implementó el método AHP, donde se utiliza una matriz de comparación entre las variables condicionantes utilizando la escala de evaluación e importancia propuesta por (Saaty, 1980) con valores de 1 a 9 como se observa en la Tabla 32. Para diligenciar la matriz de comparación de Saaty se conformó una mesa técnica con todos los ingenieros geólogos e ingenieros civiles del equipo. Los valores obtenidos de cada ingeniero fueron sumados y obtenido una media ponderada de acuerdo con la experiencia de cada profesional. De acuerdo con la metodología de AHP a partir la matriz de comparación se estima el vector de peso prioritario normalizado, que corresponde al vector asociado al mayor valor propio de la matriz de comparación.

Para asegurar la consistencia en los valores otorgados por el panel de expertos se utiliza el Índice de Consistencia  $IC$ , el cual se estima de la siguiente forma:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (8.2)$$

Donde  $\lambda_{max}$  es el máximo valor propio y  $n$  el orden de la matriz. El  $IC$  puede varía entre 0 y 1, valores cercanos a 0 significan una alta probabilidad que los pesos fueron generados aleatoriamente. Valores menores a 0,10 se consideran aceptables (Saaty, 1980)(Ayalew y Yamagishi, 2004)

La Tabla 33 presenta la calificación ponderada realizada para cada variable. La Tabla 34 presenta los pesos finales de cada variable. El índice de consistencia ( $IC$ ) obtenido es de 0,086, lo cual señala una evaluación coherente.

Tabla 32: Escala de importancia relativa. modificada de (Saaty, 1980)

Escala	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Las dos actividades contribuyen de forma igual a la ocurrencia
3	Moderada importancia	La experiencia y juicio del experto ligeramente favorecen una actividad sobre la otra
5	Fuerte importancia	La experiencia y juicio del experto favorecen fuertemente una actividad sobre la otra
7	Muy fuerte o demostrada importancia	La experiencia y juicio del experto favorecen muy fuertemente una actividad sobre la otra
9	Extremadamente importante	La evidencia favorece una actividad sobre la otra en el máximo posible orden de afirmación
2,4,6,8	Valores intermedios	Cuando es requerido un valor intermedio
Valores recíprocos	Valor recíproco	Utilizados cuando la variable con la que se compara es más importante en la escala de 1 a 9

Tabla 33: Matriz de calificación AHP

	<b>S</b>	<b>Cin</b>	<b>Cu</b>	<b>EAS</b>	<b>RR</b>	<b>IWT</b>	<b>Ec</b>	<b>Gs</b>	<b>DF</b>
<b>S</b>	1	3	3	5	3	3	3	1	3
<b>Cin</b>	1/3	1	3	5	1/3	1/3	1/3	1/3	1
<b>Cu</b>	1/3	1/3	1	3	1	1/3	1	1/3	1/3
<b>EAS</b>	1/5	1/5	1/3	1	1/3	1/3	1/5	1/5	1/3
<b>RR</b>	1/3	3	1	3	1	1	1	1/3	3
<b>TWI</b>	1/3	3	3	3	1	1	1	1	3
<b>Ec</b>	1/3	3	1	5	1	1	1	1/3	3
<b>Gs</b>	1	3	3	5	3	1	3	1	1
<b>DF</b>	1/3	1	3	3	1/3	1/3	1/3	1	1

#### 8.5.4. Descripción de variables y estimación de pesos de las clases

A continuación se describen cada una de las variables, con su clasificación según el diagrama de frecuencia para la zona de estudio y se presentan los pesos asignados a cada clase.

Tabla 34: Pesos de las variables

Mapa	Peso %
Pendiente (S)	22,3
Cinematico (Cin)	7,5
Curvatura (Cu)	6,1
Elevacion relativa al cauce (EAS)	2,8
Relieve Relativo(RR)	10,6
Índice de humedad Topografica (TWI)	13,1
Evolución Coberturas (Ec)	11,2
Geología superficial (Gs)	18,2
Distancia a Fallas (DF)	8,2

### 8.5.4.1. Geología Superficial (Gs)

Las unidades geológicas superficiales que afloran en la zona del proyecto, corresponden principalmente a suelos residuales, saprolito y rocas alta y baja-mente meteorizadas pertenecientes a la unidad de Esquistos verdes y cuarzosos de La Mina que está compuesta por Metasedimentarias Esquistosas (PZ?ecm), de acuerdo con INGEOMINAS (2003), la cual corresponde a la unidad geológica predominante en la zona. Además de depositos cuaternarios de vertiente y llenos antrópicos asociados a intervenciones urbanísticas (Figura 80).

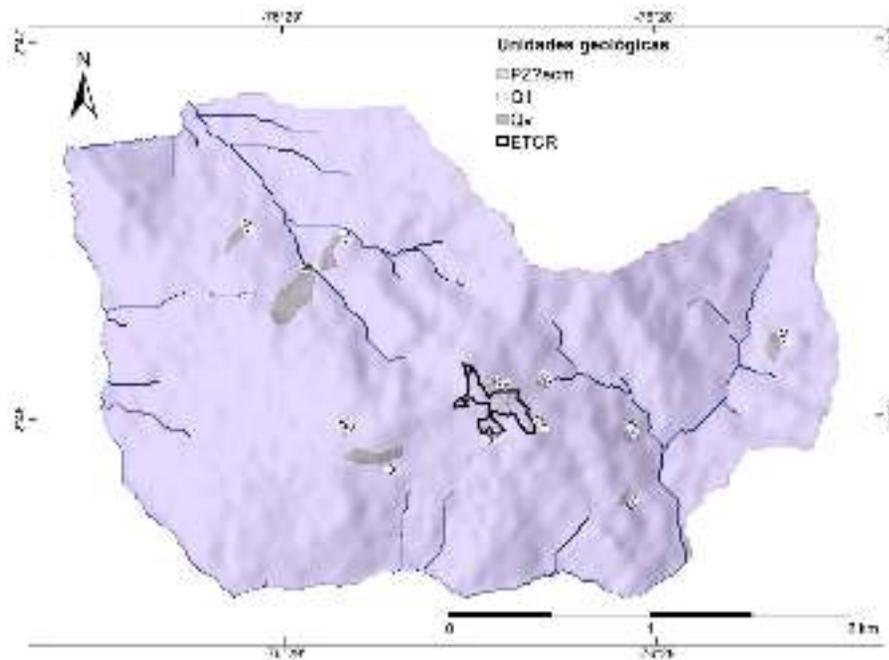


Figura 80: Mapa Unidades Geológicas Superficiales predio Los Monos

### Metasedimentarias Esquistosas (PZecm)

Esta unidad de roca representa el basamento de la zona de estudio, su perfil de meteorización se evidencia en los cortes de carretera en la zona de influencia del predio de Santa Rosa producto de la extracción de material para construcción o adecuación de la vía y afloramientos asociados a procesos morfodinámicos donde se exhiben los perfiles meteorización. A continuación, se describe el perfil de meteorización generalizado que fué observado en la zona de estudio donde predominan suelos residuales y roca meteorizada (Figura 81).

Se observa de forma superficial un horizonte rico en materia orgánica, de color variable entre café oscuro a negro, deleznable, textura limo arenosa a limo arcillosa, con abundantes raíces y restos de material vegetal



Figura 81: Perfil de meteorización de Metasedimentarias Esquistosas (PZecm)

**Suelo Residual (PZ?ecm-IB):** En este nivel, se observó una textura arcillosa en el suelo con alta consistencia, con color naranja y lentes de material arcilloso crema. El material se encuentra completamente meteorizado y no conserva estructura alguna de la roca fresca (Figuras 82a, 82b).

**Saprolito (PZecm-IC):** En general, el saprolito conserva una estructura foliada derivada de la roca original, donde predomina una textura esquistosa con la presencia de minerales arcillosos de color crema producto de la meteorización de minerales laminares y minerales de tonalidades rosas asociados a oxidación de minerales. Los espesores evidenciados van de 1-1,5 metros. En algunos afloramientos fue posible medir estructuras heredadas de foliación (Figuras 83a,



Figura 82: Suelo Residual (IB) de Metasedimentarias Esquistosas (PZecm)

83b).

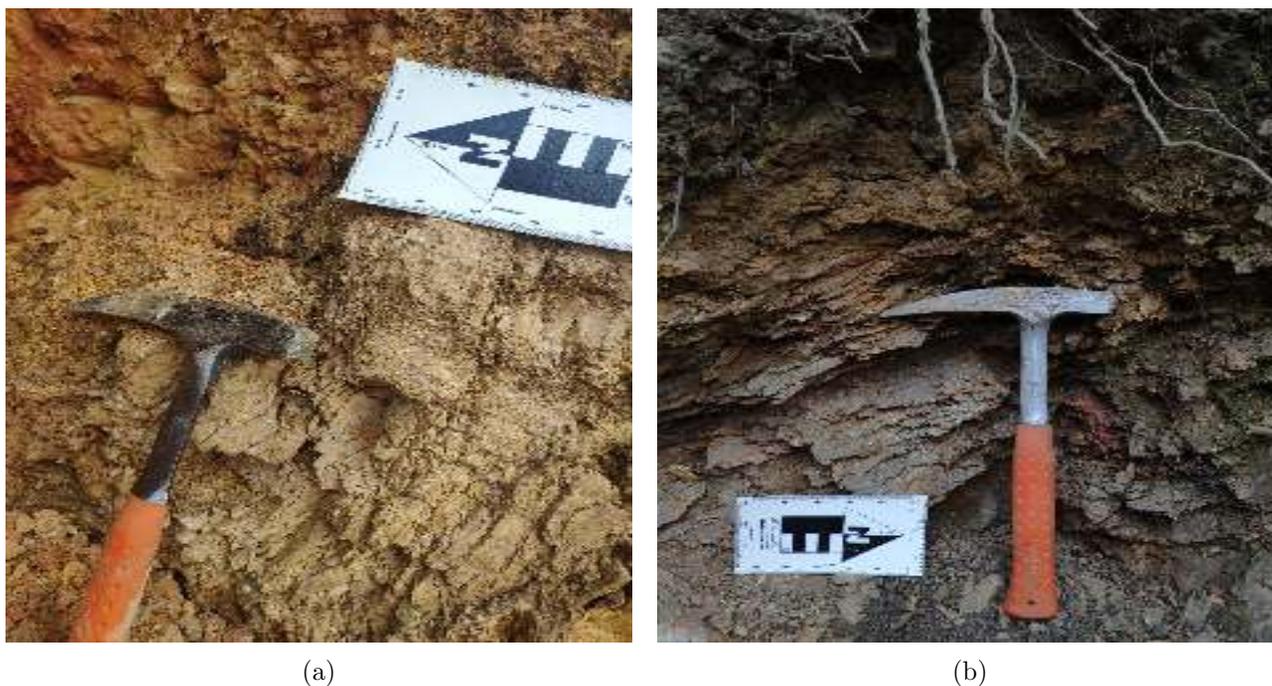


Figura 83: Saprolito (IC) de Metasedimentarias Esquistosas (PZ?ecm)

**Roca Alterada IIA (Transición Roca Suelo):** Se caracteriza por fragmentos de roca altamente meteorizados con composición y estructura de (PZ?ecm)

en una matriz de suelo residual de textura arcillosa y limosa de alta consistencia, se observan vetas rosas producto de oxidación de minerales. Este horizonte solo fué visible en algunos afloramientos de forma discontinua (Figuras 84a, 84b).

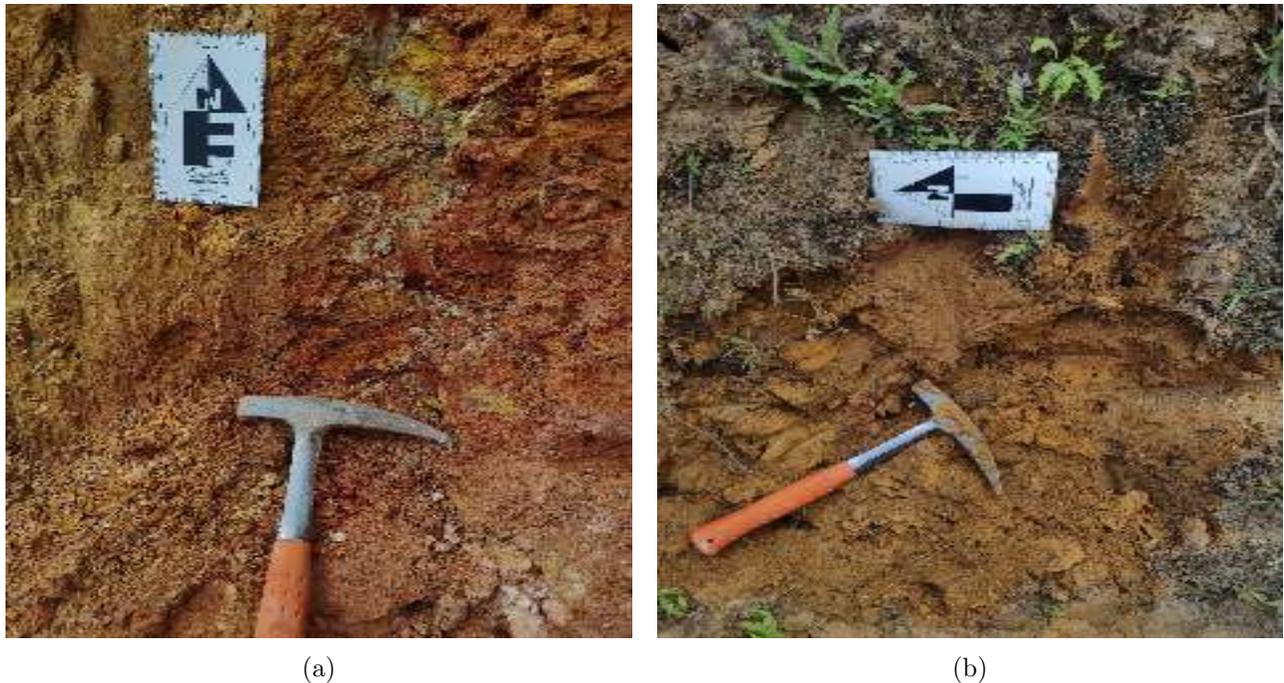


Figura 84: Roca Alterada IIA (Transición Roca Suelo)

**Roca parcialmente meteorizada (IIB):** Se observa roca metamórfica con textura esquistosa fracturada y meteorizada con presencia de minerales laminares y alto contenido de cuarzo, presenta tonalidades naranja y rosa producto de la meteorización de minerales (Figuras 85a, 85b).

#### **Depósitos de Vertiente (Qv)**

Corresponden a materiales asociados a depósitos generados a lo largo de la vertiente, producto de la meteorización, desprendimiento y arrastre de los mismos desde las partes alta de la ladera a través de antiguos movimientos en masa (Figura 86b). Los depósitos tienen una composición heterogénea de bloques mal seleccionados y subangulosos con tamaños entre los 0,5m- 1,5m de diámetro en una matriz de suelo en proporciones variables (Figura 86a). Los bloques tienen una composición de (PZ?ecm) moderadamente meteorizados.

#### **Llenos Antrópicos (Qll)**

Los llenos antrópicos están asociados a la actividad humana (artificiales), están compuestos por material heterogéneo, bloques mal seleccionados exhibiendo y una matriz de suelo removido a partir de explanaciones de terreno pa-



(a)



(b)

Figura 85: Roca parcialmente meteorizada (IIB)



(a)



(b)

Figura 86: Afloramientos asociados A depósitos de vertiente

ra el asentamiento de estructuras civiles, escombros vertidos y materia orgánica (Figuras 87a, 87b).

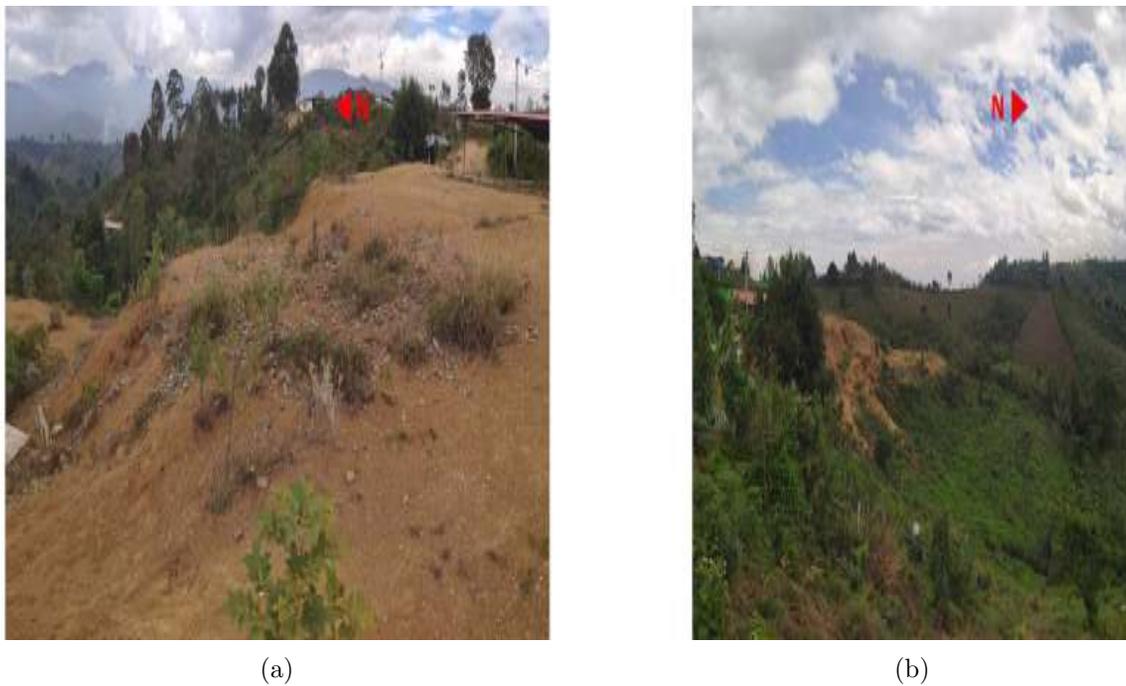


Figura 87: Llenos Antrópicos

Tabla 35: Unidades geológicas presentes en el área de influencia para la evaluación de amenaza en el antiguo ETCR Los Monos

Símbolo	Unidad	%Área	Peso
PZ?ecm	Metasedimentarias Esquistosas	98,95	0,8
Qv	Depósitos de Vertiente	0,03	0,6
Qll	Lleno Antrópico	0,02	0,7

### 8.5.4.2. Evolución de las coberturas (Ec)

Para el mapa de coberturas se utilizó la imagen satelital correspondiente al primer semestre del año 2020 de la misión Sentinel-2. A esta imagen se le aplicó un filtro para reducir la cobertura de nubes. A partir de esta imagen procesada, se implementó una clasificación supervisada a través del algoritmo de clasificación *Random Forest* para cuatro categorías de coberturas: urbano, bosque, pastos y suelo desnudo. En la Figura 88 se puede observar la distribución de las coberturas. Al occidente de la cuenca predomina la cobertura boscosa mientras que al oriente se encuentran más pastos y suelos desnudos limitados por bosques de galería. También se encuentran zonas de suelos desnudos asociadas a las vías. Las zonas urbanas se encuentran concentradas en el predio del antiguo ETCR.

La evaluación de la clasificación obtenida fue validada a través de la matriz

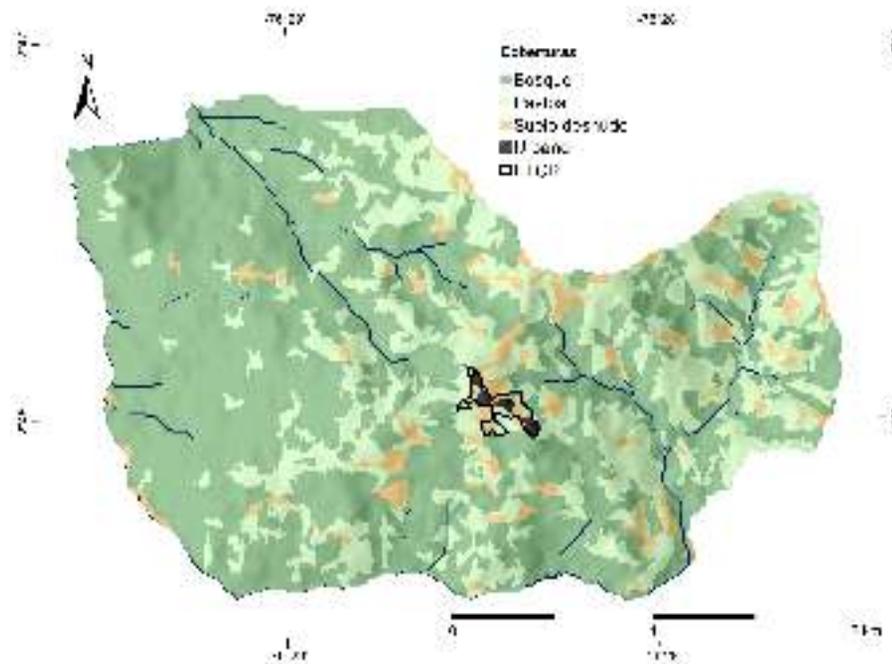


Figura 88: Coberturas actuales.

de confusión que se observa en la Tabla 36. En algunos casos el tipo de cobertura denominado suelo desnudo es clasificado erróneamente como urbano y los pastos como bosques, aunque en muy baja proporción, sin embargo se obtiene un excelente coeficiente Cohen-Kappa de 0,952.

Tabla 36: Matriz de confusión del algoritmo de clasificación. Los valores se dan en porcentaje (%).

		Predicción			
		Urbano	Bosques	Pastos	Suelo desnudo
Realidad	Urbano	100,0	0	0	0
	Bosques	0	100,0	0	0
	Pastos	0	8,2	91,8	0
	Suelo desnudo	4,3	0	0	95,7

El índice de vegetación normalizado (NDVI) propuesto por Rouse et al., 1974, es una metodología para identificar los cambios en la vegetación mediante el uso de imágenes satelitales y la diferencia normalizada de las banda roja e infrarrojo cercano (Gilabert, González-Piqueras, y García-Haro, 1997). Este índice, calcula la relación entre la energía emitida y absorbida por los objetos terrestres, resaltando el estado de vigor vegetativo de una zona. Al ser un índice no dimensional, sus valores oscilan entre -1 a 1, donde valores positivos indican una vegetación saludable, valores negativos representan aguas o alto contenido

de humedad y el valor de 0, 1 corresponden a tierra desnuda (Zhu y cols., 2013). Sin embargo, los valores mas altos son indicadores de actividad fotosintética (Tovar, 2012).

Para el análisis del NDVI en el área de estudio del antiguo ETCR Los Monos, se utilizaron imágenes satelitales Landsat 5 para los años 1985, 1991, 1996, Landsat 7 para el año 2015, Landsat 8 para el año 2018 y Sentinel 2 para el año 2020.

En la Figura 89 se presenta el NDVI de la zona para el año 1991 y 2020, donde se puede observar que en la temporada 2020 hubo una disminución de vegetación vigorosa en la región centro de la cuenca, respecto al año 1991. Sin embargo, en la zona centro-oriente se efectuó un aumento en los valores de NDVI debido a la conservación de la vegetación en esa área.

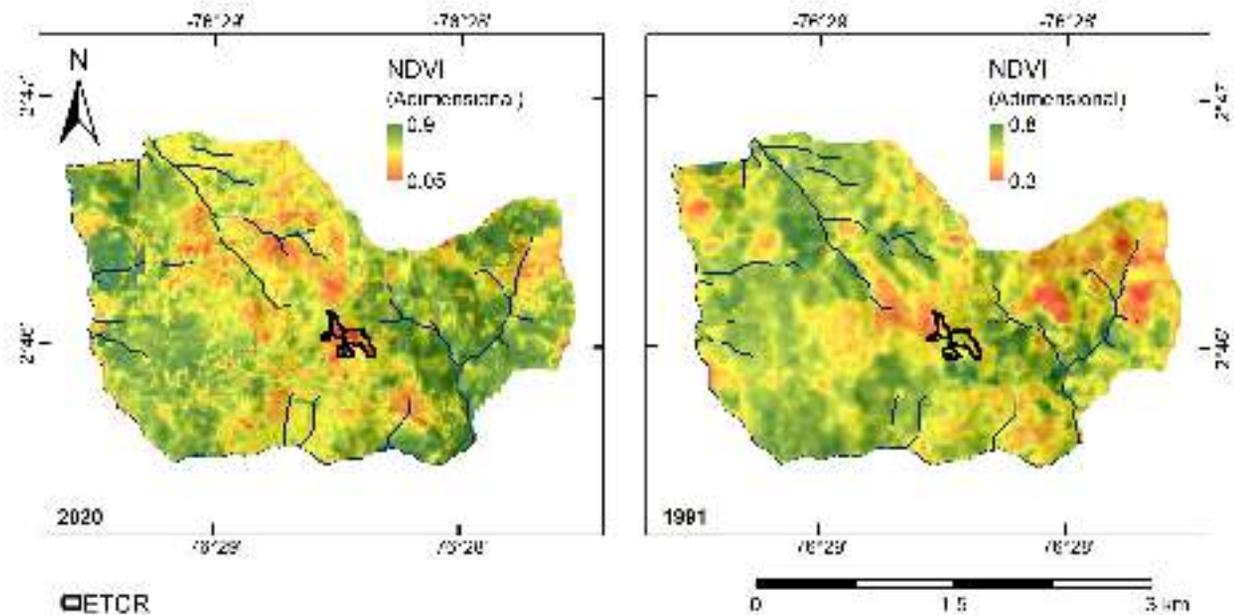


Figura 89: Índice vegetación normalizado Los Monos año 1991-2020

En la Figura 90 se muestra la tendencia de los valores mínimo, máximo y medio del NDVI respecto a cada uno de los periodos en cuestión. Se observa que el comportamiento medio de la cuenca es a crecer hasta el año 2018, debido a que luego de este año se intensificaron las construcciones en la zona y/o deforestación, implicando una baja en el NDVI. Los valores mínimos presentan una baja gradual desde el año 1991 en respuesta a una disminución en la vigorosidad vegetativa.

Con el fin de determinar las variaciones de la vegetación a lo largo del tiempo

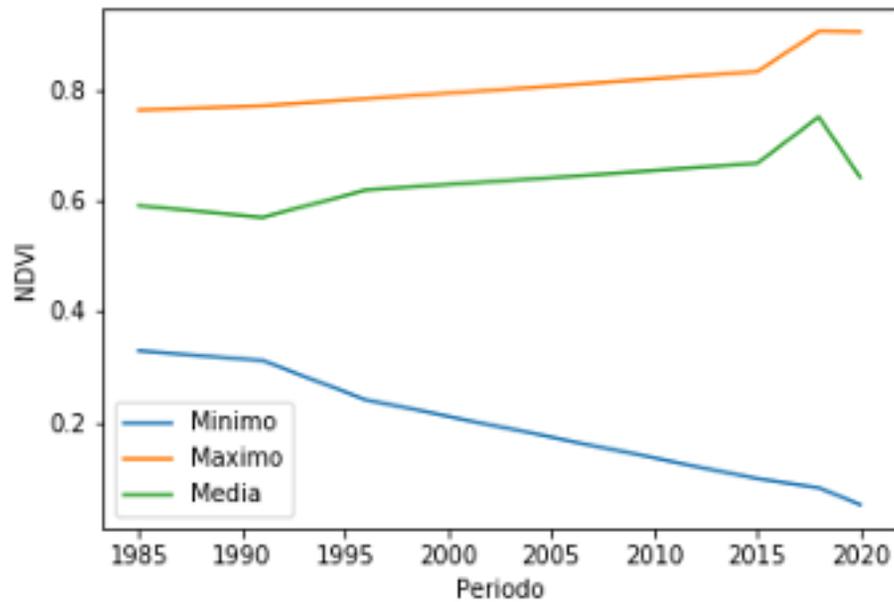


Figura 90: Representación estadística NDVI Los Monos

se realizó una observación multitemporal del NDVI, la cual permite efectuar un análisis de tres momentos temporales en una sola imagen 1991, 2015 y 2020. Este procedimiento se basa en trabajar tres periodos temporales de crecimiento vegetal y generar una composición RGB, la cual se fundamenta en la combinación de los tres índices NDVI de forma simultánea (Sader y Winne, 1992).

La correlación efectuada entre la banda del rojo, verde y azul con el respectivo valor temporal de NDVI permite representar las tasas de cambio vegetal a lo largo del tiempo a través de la combinación de colores, identificando así presencia de vegetación, suelo desnudo o agua a lo largo del tiempo. La tonalidad de estos colores se encuentra en función de la ausencia o presencia de la vegetación para cada periodo y la fase de crecimiento vegetal (Sader y Winne, 1992). Alguno de los colores percibidos en el análisis multitemporal del NDVI se representan en la Figura 91, donde Periodo 1, Periodo 2 y Periodo 3 corresponden a los años analizados, con presencia de vegetación (+) o ausencia de vegetación (0) para cada uno.

La Figura 92, muestra el mapa de combinación RGB multitemporal para los años 1991, 2015 y 2020 en el área de estudio Los Monos. Se puede observar las variaciones que ha sufrido la vegetación en esta cuenca a lo largo del tiempo debido a los diferentes tonos de color que presenta espacialmente. Donde, el

Periodo 1	Banda Rojo	+	+	+	0	0	0	+	0
Periodo 2	Banda Verde	0	+	+	+	0	0	0	+
Periodo 3	Banda Azul	0	0	+	+	+	0	+	0
Resultante									

Figura 91: Tonalidades resultantes de combinación NDVI multitemporal

tono de color naranja presente en la parte norte del área de estudio indica vigorosidad para los periodos 1991 y 2015, el tono de color fucsia en la parte centro oriente indica vigorosidad en la vegetación para los periodos 1991 y 2020, los tonos verdes indican mayor vigorosidad para el año 2015 y los tonos azules indican presencia de vegetación con mayor vigorosidad para el año 2020.

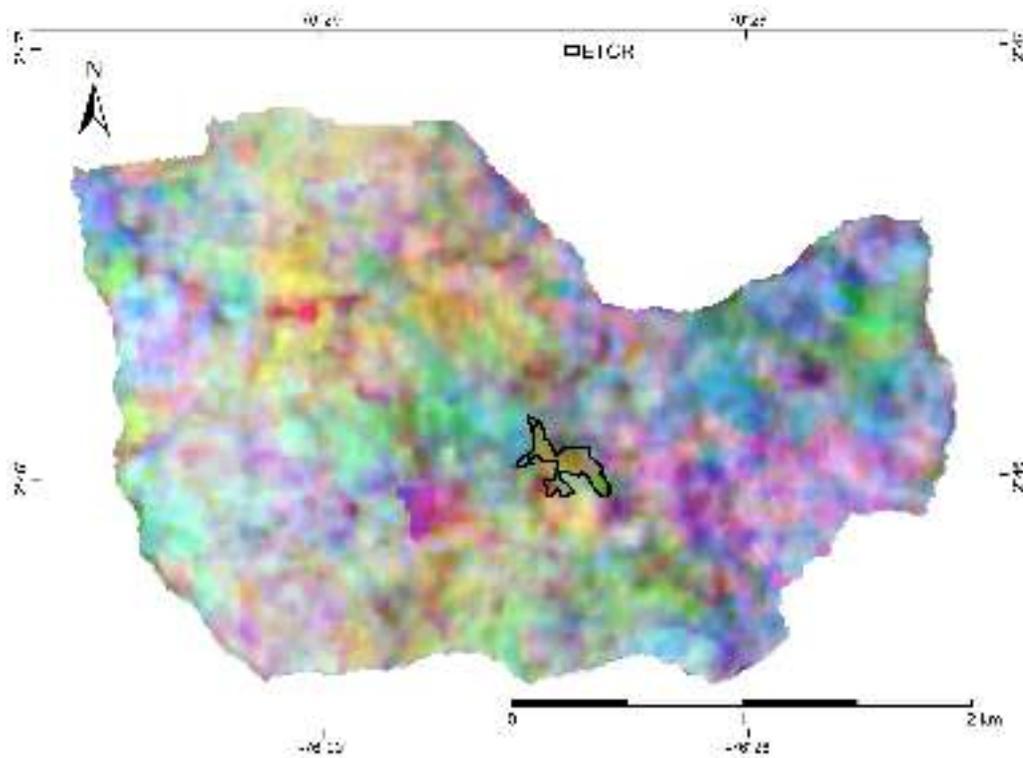


Figura 92: Representación multitemporal NDVI

La evolución de las coberturas hace referencia al cambio que han sufrido las coberturas en la cuenca a través de los años. Este análisis parte del año 1996 y concluye en el año 2020 evaluando como han evolucionado las cuatro categorías

de cobertura: bosques, pastos, suelos desnudos y construcciones urbanas.

En el año 1996 la cobertura boscosa alcanzaba cerca del 46 % de la cuenca, los pastos un 21 % y los suelos desnudos cubrían un 33 % del área. Los suelos urbanos, aunque presentes, no son representativos ni cubren un área extensa. Para el año 2008 el área clasificada como suelo desnudo disminuyó un 20 % al aumentar la cobertura boscosa, que llegó a más del 70 %.

Para el año 2016 la cobertura boscosa disminuye abruptamente a tan solo 20 % de la cuenca y los pastos dominan el área con el 56 % del área; también se tiene un aumento de 10 % de los suelos desnudos Finalmente, en el último año analizado, el 2020, los bosques recuperan territorio al cubrir el 65 % del área dada la disminución de los pastos q llegan al 28 % y de los suelos desnudos a 5 %.

Espacialmente, los bosques se han mantenido relativamente constantes en los bordes de la cuenca y como pequeños mosaicos en su interior asociados a los drenajes. Los pastos se encuentran principalmente en la zona central representando la transición entre los bosques y los suelos desnudos.

A pesar de que la cobertura urbana no es muy extendida en la cuenca, al analizar su extensión en todo el análisis temporal se encuentra que está asociada principalmente con el predio del antiguo ETCR ya que las demás construcciones son pequeñas y aisladas en la cuenca. Esto se puede observar en la Figura 93.

La evolución de las coberturas se representa a través de una variable numérica que indica el grado de cambio, sea positivo o negativo, que ha sufrido la cobertura. La escala categórica de las coberturas parte de la mejor cobertura, bosques, sigue con pastos, luego suelo desnudo y, finalmente, suelo urbano. Por lo tanto, la variable de cambio es mayor, entre más lejos las categorías iniciales y finales se encuentren una de otra. Se tiene el 0 como punto central de la escala numérica para las áreas que no sufrieron cambio en su cobertura. Los números positivos representan mejoras en la cobertura o un cambio hacia la izquierda en dicha escala categórica y su magnitud depende del cambio entre coberturas. Por ejemplo, un área que pasa de pastos a bosques tendrá un valor de 1 mientras que un área que pase desde suelos desnudos a bosques tendrá un valor de 2. Por el contrario, los números negativos indican degradación en la cobertura. Por ejemplo, si un área pasa de bosque a pastos tendrá un valor de -1 y si pasa a construcciones urbanas tendrá un valor de -3.

En la Figura 94 se presenta esta variable y, como se puede observar, los cambios negativos mayores se asocian principalmente al predio del antiguo ETCR

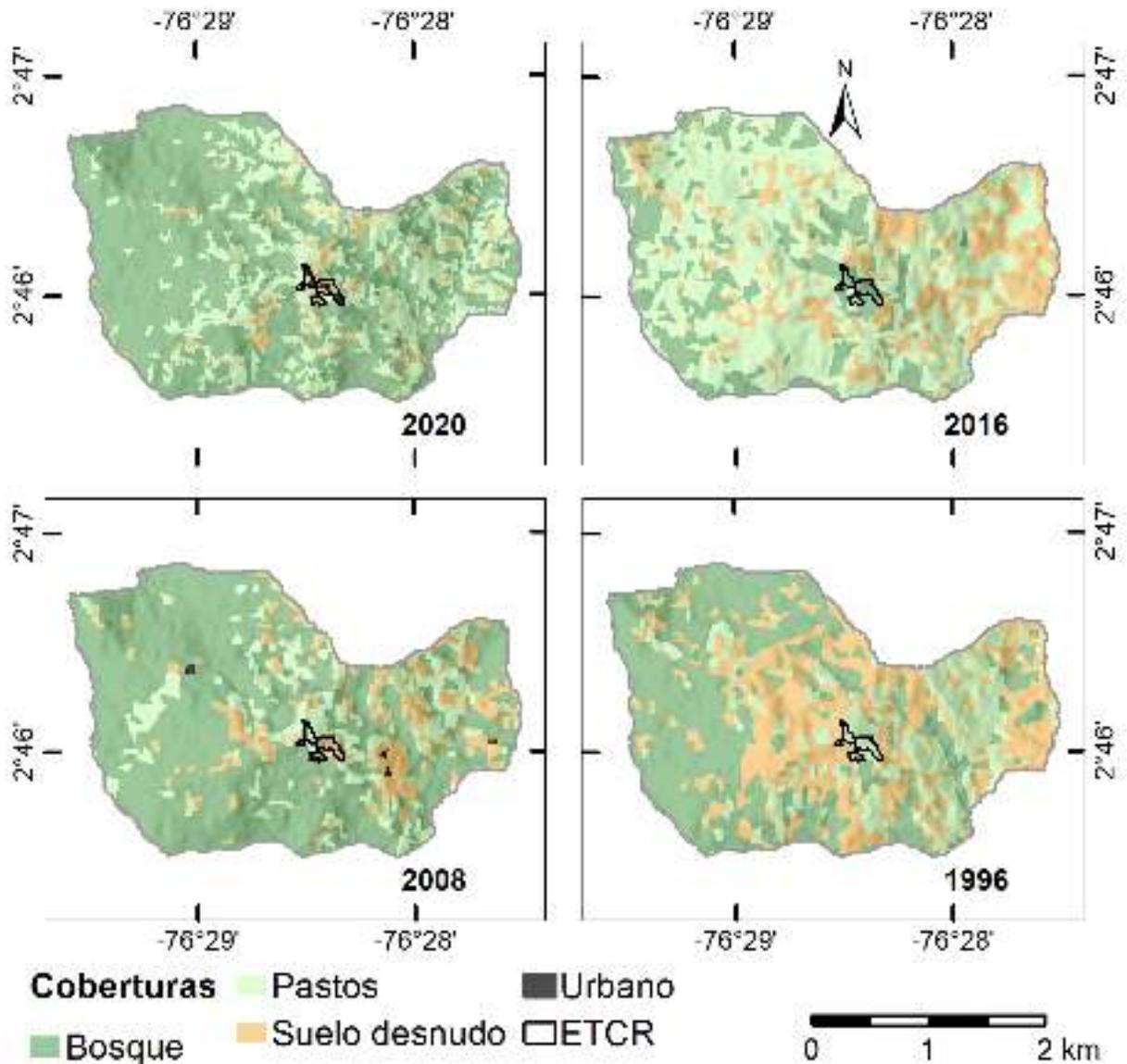


Figura 93: Evolución de las coberturas multitemporal.

pro su connotación urbana mientras que a sus alrededores se encuentran cambios positivos de gran magnitud asociados a el aumento de la cobertura boscosa. Al occidente de la cuenca en general las coberturas permanecen estables.

La Figura 95 muestra el comportamiento que ha presentado el área de estudio respecto a la variación de la cobertura. Para este análisis se tomó el mapa de cobertura de los años 1996 y 2020 utilizando el algoritmo de clasificación Random Forest y el uso del satélite Sentinel-2. Luego de tener el cambio de cobertura, se realizó la asignación de pesos o magnitud en términos de estabilidad a ca-

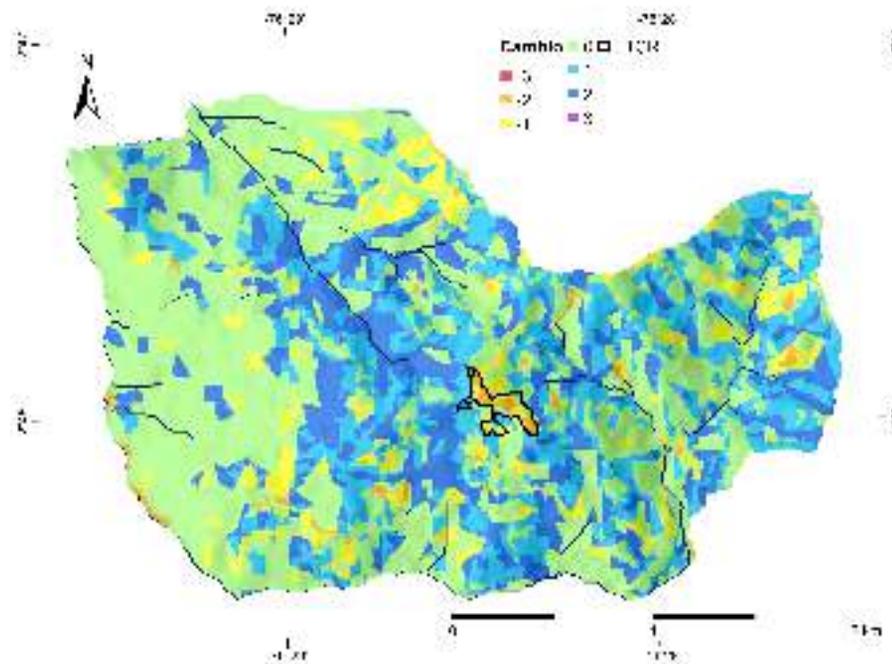


Figura 94: Evolución de las coberturas.

da cambio en función de los resultados obtenidos en el análisis multitemporal del NDVI, donde dichos pesos fueron asignados de 0 (no susceptible) a 1 (muy susceptible). Donde, las zonas que presentaron una evolución a bosque, se les asignó un peso de 0,1, debido a que estos son cambios positivos que favorecen la estabilidad y además, los valores de NDVI para el año 2020 variaban entre 0,7 a 0,8 siendo los más altos del área de estudio. Por otra parte, los cambios negativos son aquellos que favorecen la inestabilidad, como es el caso de coberturas evolucionadas a pastos, suelos desnudo o urbano, para los cuales los pesos asignados a estas coberturas fueron de 0,2-0,4, 0,5-1 y 0,5 respectivamente debido a que el NDVI para el año 2020 de las zonas evolucionadas a pastos presenta variación entre 0,6-0,8, para las zonas evolucionadas a suelo desnudo entre 0,2-0,5 y las áreas evolucionadas a Urbano de 0,1 aproximadamente (ver Tabla 37).

### 8.5.4.3. Clasificación cinemática de laderas (Cin)

Los ambientes geológicos y estructurales que enmarcan las laderas han sido considerados como factores relevantes en la ocurrencia de movimientos en masa (Varnes, 1978). Estas características morfo-estructurales parten de la relación entre las discontinuidades estructurales o las estructuras inherentes de la roca, como foliación o estratificación, y la topografía en que es definido el vínculo entre

Tabla 37: Cambio de cobertura antiguo ETCR Los Monos

Cambio	Área %	WoE
Bosque a Bosque	38,2	0
Bosque a Pastos	6,0	0,6
Bosque a Suelo desnudo	1,0	1
Pastos a Urbano	0,3	0,6
Pastos a Bosque	9,4	0
Pastos a Pastos	9,4	0,2
Pastos a Suelo desnudo	1,9	0,8
Suelo desnudo a Urbano	0,0	0,2
Suelo desnudo a Bosque	18,3	0
Suelo desnudo a Pastos	12,8	0,4
Suelo desnudo a Suelo desnudo	2,6	0,6

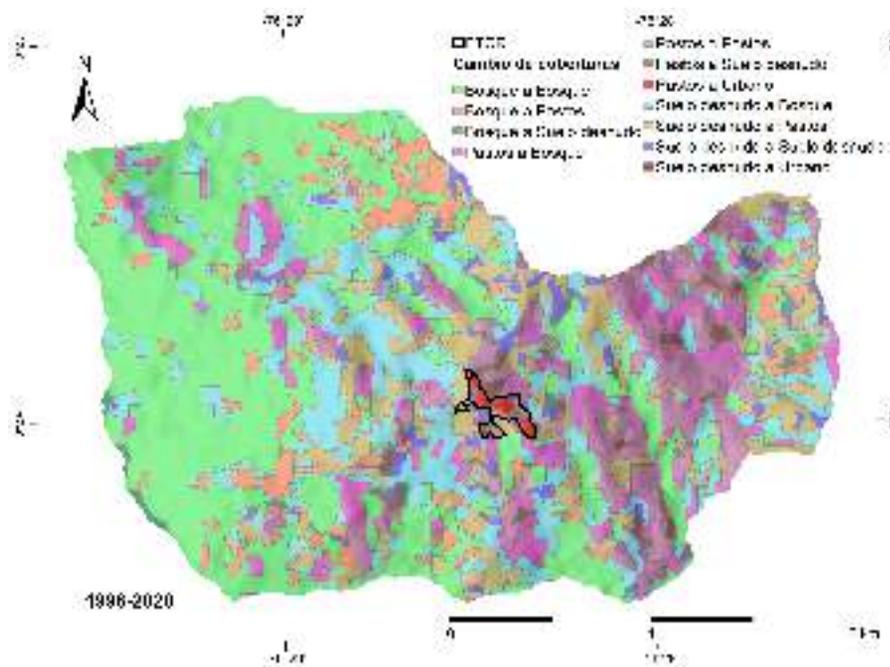


Figura 95: Cambio coberturas año 1996-2020

la aptitud, rumbo y buzamiento, de los planos estructurales y la geometría de la ladera, aspecto y pendiente (Guzzetti, Reichenbach, Ardizzone, Cardinali, y Galli, 2006). Inicialmente se clasifican las laderas en tres categorías básicas según la relación entre el aspecto y la dirección del buzamiento de la estructura (Cruden y Hu, 1996): cataclinales, si la estructura buza en la misma dirección a la ladera, anaclinales, si la estructura buza en dirección opuesta a la ladera y ortoclinales, si la estructura buza perpendicularmente a la ladera.

Posteriormente, las laderas cataclinales y anaclinales pueden ser subclasificadas con base al alineamiento entre el buzamiento de la estructura y la pendiente

de la ladera. Para las laderas cataclinales, si la pendiente es mayor al buzamiento de la estructura, se llama cataclinal *overdip*, si es menor, se conoce como cataclinal *underdip* y si estos valores son iguales se le conoce como cataclinal *dip*. Laderas anaclinales son llamadas normales cuando su pendiente es perpendicular al buzamiento de las estructuras, empinadas cuando la pendiente es mayor al ángulo de buzamiento y suaves en la condición contraria.

En este sentido, las laderas son clasificadas según su relación con las estructuras litológicas y se les asignan los pesos según su influencia en la ocurrencia de movimiento en masa a partir de la Tabla 38.

Tabla 38: Clasificación cinemática de laderas. A: aspecto (0°-360°), S: pendiente (0°-90°),  $\alpha$ : dirección del buzamiento (0°-360°) y  $\theta$ : buzamiento (0°-90°). Modificado de Meentemeyer y Moody (2000).

Categoría	Condición	Subcategoría	Condición	WoE
Ortoclinal	$ A - \alpha  = 90^\circ \pm 45^\circ$ o $270^\circ \pm 45^\circ$			0, 2
Cataclinal	$315^\circ <  A - \alpha  < 45^\circ$	overdip	$S > \theta$	1
		dip	$S = \theta$	1
		underdip	$S < \theta$	0, 6
Anaclinal	$135^\circ <  A - \alpha  < 225^\circ$	empinado	$S > \theta$	0, 2
		normal	$S = \theta$	0, 2
		suave	$S < \theta$	0, 2
No estructural	Depósitos			0,0

Los depósitos y llenos antrópicos no constituyen materiales de comportamiento frágil ni aportan información morfo-estructural relacionada con la dinámica de los esfuerzos presentes en las rocas, por lo tanto este análisis no es realizado sobre estos materiales que clasifican bajo el nombre “no estructural” y, consecuentemente, se les asigna un peso de 0. La distribución espacial de esta clasificación de las laderas se observa en la Figura 96. Al occidente de la cuenca domina la categoría ortoclinal, mientras que al oriente se concentran en las vertientes bajas al dominar las laderas cataclinal overdip. En las cuencas de los drenajes tributarios se encuentran principalmente las laderas anaclinales en sus tres subcategorías.

#### 8.5.4.4. Índice de humedad topográfica (TWI)

El índice de humedad topográfica describe la tendencia de un sitio a saturarse dada su área contribuyente y las características de la pendiente local (Gruber y Peckham, 2009). Esta componente es importante ya que relaciona la humedad

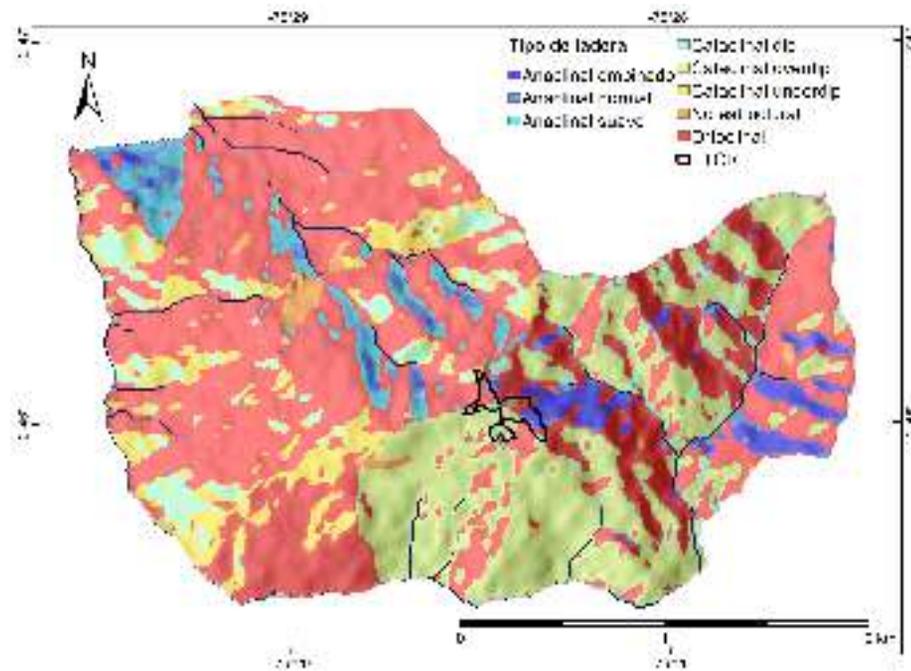


Figura 96: Clasificación cinemática de laderas.

edáfica y la tendencia del suelo a generar escorrentía. Se obtuvo con el software Whitebox GAT y la herramienta *Wetness Index*, cumpliendo la ecuación:

$$Wi = Ln \frac{As}{\tan(slope)} \tag{8.3}$$

Donde *As* es el mapa raster de acumulación de flujo y *emphSlope* es el raster de pendiente en grados, generado a partir del modelo de elevación corregido. Esta variable se dividió en cinco clases. La Figura 97 y la Tabla 39 presentan la distribución del índice de humedad topográfica en el área de influencia, así como los pesos asignados a cada clase para la evaluación de la amenaza.

Para la variable del índice de humedad topográfico se presentan valores altos con respecto al porcentaje de área total en los rangos de menores a -5 “No Acumula” , de -5 a 1,6 “Muy Bajo” , de 1,6 a 3 “Bajo” , y de 3 a 4,5 “Medio” , con porcentajes de 16,5 % ,14,7 % , 30,4 % ,y 23,8 % respectivamente (ver Tabla 39) .El porcentaje con mayor valor con respecto al área total es el de 30,4 % Estos rangos se encuentran distribuidos por toda el área de estudio y se encuentran principalmente en el tope de los filos y cimas de las colinas (Figura 97).

Para los rangos de 4,5 a 6 “Alto” , y de mayores a 6 “Muy alto” se tienen valores con respecto al porcentaje de área total más bajos de 8,8 % y 5,6 % , respectivamente. Con un total de 14,7 % estos valores se encuentran por lo

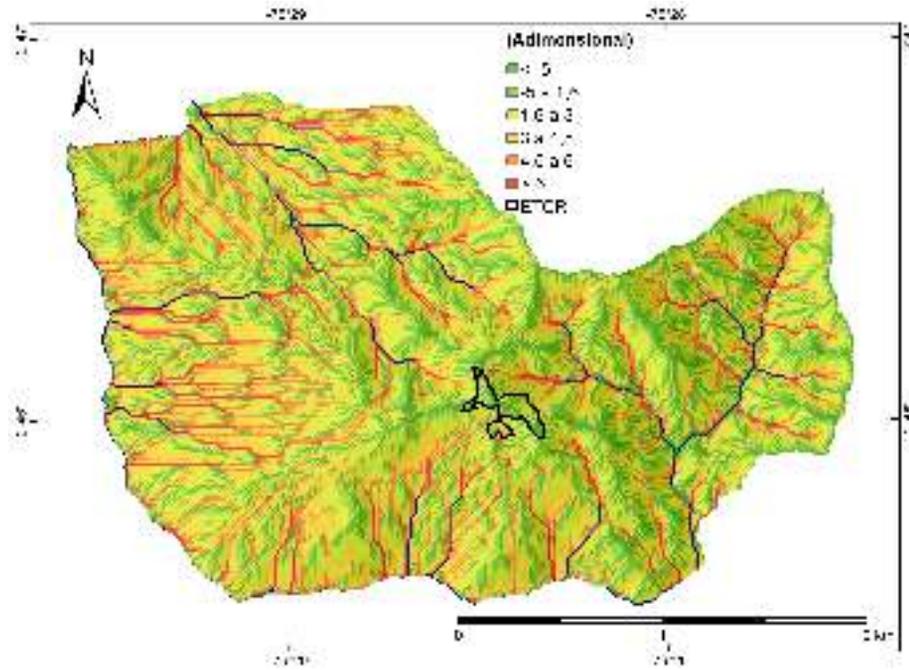


Figura 97: Mapa del Índice de humedad topográfica antiguo ETCR Los Monos

general bordeando los cauces de las quebradas y mostrando a su vez los patrones de drenaje (Figura 97).

Tabla 39: Índice de humedad topográfica antiguo ETCR Los Monos

Rangos	Categoría	Área %	WoE
< -5	No acumula	16,5	0
-5 a 1,6	Muy baja acumulación	14,7	0,2
1,6 a 3	Baja acumulación	30,4	0,4
3 a 4,5	Media acumulación	23,8	0,6
4,5 a 6	Alta acumulación	8,8	0,8
> 6	Muy alta acumulación	5,9	0

### 8.5.4.5. Distancia a las Fallas (DF)

La distancias a fallas que predominan con respecto al porcentaje de área total se encuentra en los rangos de mayor de 1000 m , este representa un 82,5 % del área total (ver Tabla 40) . Para los rangos menores de 500 m, de 500 a 800 m, de 800 a 1000 m, con porcentajes de 3,7 %,7,7 %, y 6,0 %, respectivamente. Estos valores representan un 17,4% con respecto al área total y se encuentran concentrados en la parte Oriental de la zona de estudio. No hay evidencia de demarcaciones de fallas presentes en la zona, y es claro el predominio del rango de mayor de 1000 m (ver Fig. 98).

Tabla 40: Tabla de distancia a las fallas del antiguo ETCR Los Monos

Rangos	Área %	Peso
< 500	3,7	0,85
500 a 800	7,7	0,72
800 a 1000	6,0	0,62
> 1000	82,5	0,29

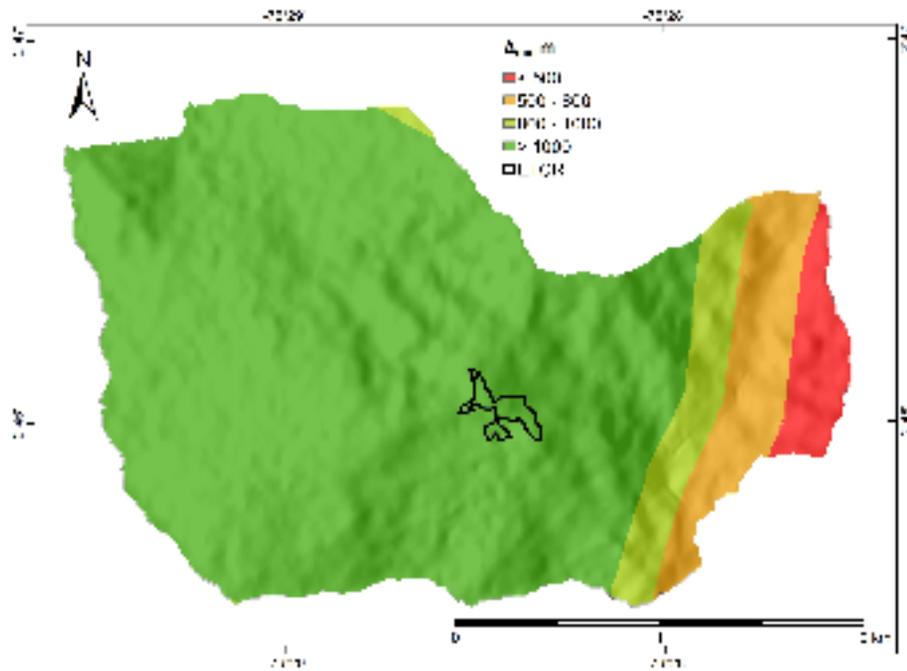


Figura 98: Mapa de distancia a las fallas antiguo ETCR Los Monos

**8.5.4.6. Relieve relativo (RR)**

En la zona de estudio predominan los rangos de 200 a 250m , de 250 a 300m,de 300 a 250m con porcentajes con respecto al área total de 18,1 %, 22,2 %, y 21,5 %, respectivamente. Siendo el rango de 250 a 300m el que posee mayor valor porcentual del área total. Estos valores se encuentran distribuidos en toda la zona de estudio con concentraciones en la parte sur y occidental , al igual que los anteriores los rangos de 150 a 200m y mayores a 350m con porcentajes respecto al área total de 15,4 % y 15,9 % se presentan en estas mismas zonas (ver Tabla 41) .Para los rangos de menores a 150m se evidencia un valor porcentual del 6,82 % que lo ubica como el valor más bajo de entre todas las clases citadas anteriormente y se ubica mayoritariamente en la zona oriental de toda el área de estudio (Figura 99).

Tabla 41: Índice de relieve relativo ETCR Los Monos

Rangos	Área%	WoE
< 150	6,82	0
150-200	15,41	0,2
200-250	18,10	0,4
250-300	22,20	0,6
300-350	21,49	0,8
> 350	15,98	1

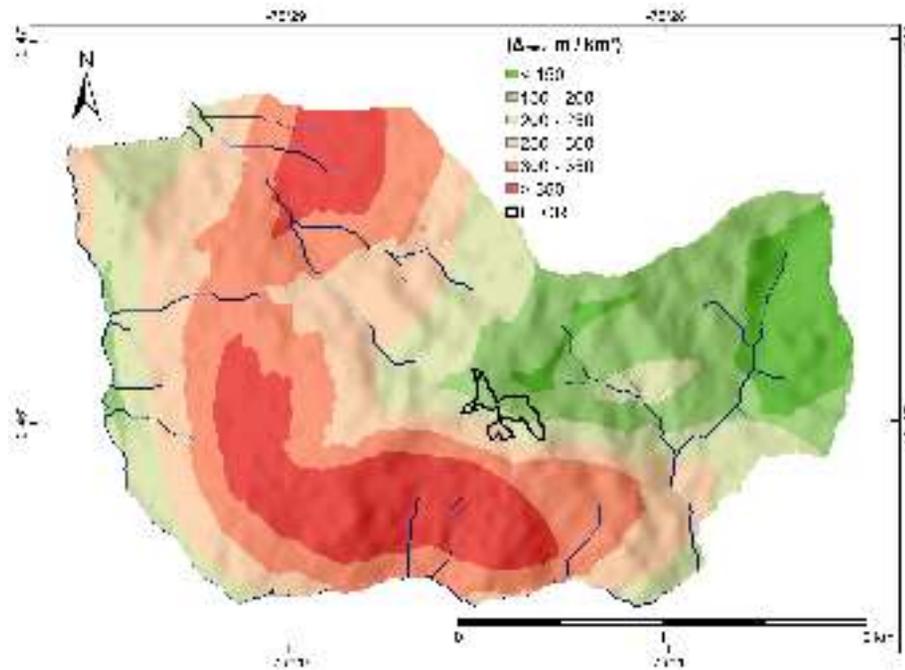


Figura 99: Mapa de relieve relativo del antiguo ETCR Los Monos

#### 8.5.4.7. Pendiente (S)

En la zona de estudio predominan los rangos de pendiente de 12 a 16°, de 16 a 20°, de 20 a 24° con porcentajes respecto al área total de 19,4%, 24,7%, 19,8%, respectivamente. El rango de 16 a 20° con un porcentaje de 24,7% se posiciona como el más alto en términos de su porcentaje de área (ver Tabla 42). Las concentraciones de estos rangos se encuentran distribuidos a lo largo de toda la zona de estudio. Los rangos de pendientes menores a 8°, de 8 a 12°, de 24 a 30° y mayores a 30°, representan solo un 36,2% del área total y se presentan distribuidos en toda la zona de estudio, los valores mayores a 30° y menores a 8° solo representan un 11,2% del área total y se distinguen por ser los menores. En el margen de la zona sur del mapa se aprecian zonas que concentran los valores de los rangos muy abrupta, escarpada, y muy escarpada

(Figura 100).

Tabla 42: Tabla de Índice de la pendiente del antiguo ETCR Los Monos

Rangos	Área %	Pesos
< 8	5,4	0
8 a 12	10,2	0,2
12 a 16	19,4	0,4
16 a 20	24,7	0,6
20 a 24	19,8	0,8
24 a 30	14,7	1
> 30	5,8	0,4

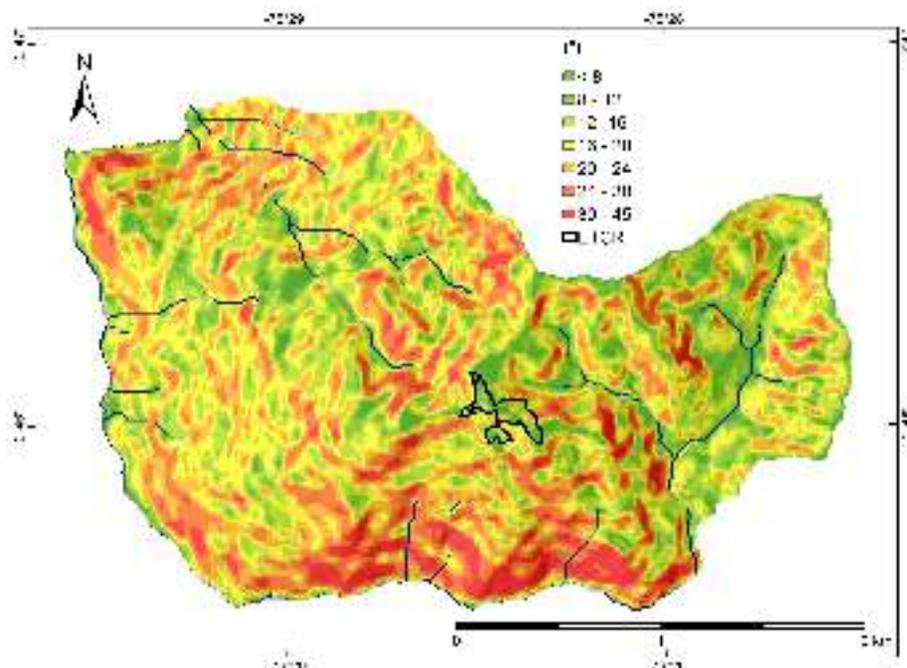


Figura 100: Mapa de Pendientes del antiguo ETCR Los Monos

#### 8.5.4.8. Elevación relativa al cauce (EAS)

En general, los rangos de elevación relativa al cauce se encuentran ampliamente distribuidos por la zona de estudio. A pesar de esto, se destacan los rangos de menor a 25 m , de 25 a 50 m, de 50 a 80 m con porcentajes con respecto al área total de 22,1 %,18,4 %,19,8 %, respectivamente. Siendo el de menor a 25 m el rango con mayor porcentaje con respecto al área total con un 22,1 % (ver Tabla 43). Estos rangos se muestran en el mapa bordeando los cauces de las quebradas presentes en la zona, mostrando los patrones de drenajes y dando una delimitación aproximada del comportamiento de la forma de las

Tabla 43: Tabla de Índice de elevación relativa al cauce del antiguo ETCR Los Monos

Rangos	Área %	WoE
< 25	22,1	1
25 a 50	18,4	0,8
50 a 80	19,8	0,6
80 a 120	16,1	0,4
120 a 200	15,3	0,2
> 200	8,2	0,1

cuencas presentes en la zona (Figura 101). Los demás rangos de 80 a 120 m, de 120 a 200 m y mayor a 200 m tienen porcentajes con respecto al área total de 16,1 %, 15,3 %, y 8,2 % . Siendo el rango de mayor a 200 m el menor con solo un 8,2% del área total.

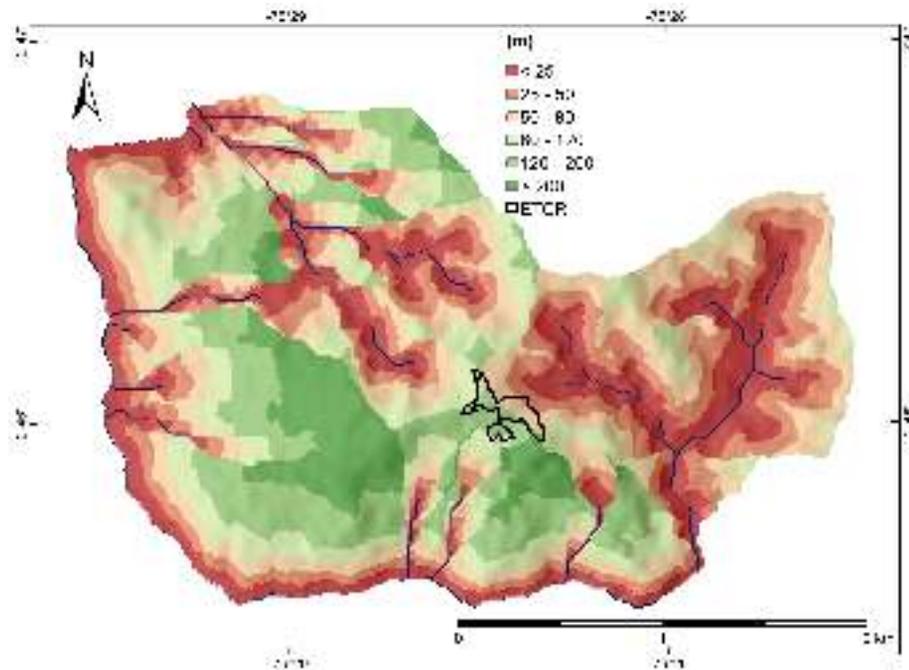


Figura 101: Mapa Índice de elevación relativa al cauce del antiguo ETCR Los Monos

### 8.5.4.9. Curvatura (Cu)

La curvatura determina el grado de convexidad o concavidad de la superficie en la dirección de la pendiente (longitudinal). Esta variable puede ser evaluada en tres dimensiones: plana, perfil y tangencial; en este caso se evalúa en dos dimensiones: plana y perfil; en la primera, el valor 0 indica que la superficie es plana, valores positivos indican concavidad y valores negativos indican que la superficie es convexa, en el caso del segundo, el valor 0 indica que la superficie es

plana, valores positivos indican que la superficie es convexa y los valores negativos indican concavidad, la Tabla 44 muestra los rangos tomados para cada clase según los dos diferentes mapas de curvatura. Esta variable señala la efectividad de la topografía para concentrar o dispersar la mayor cantidad de agua de lluvia en un punto determinado de la ladera. Dado que representa el relieve según la dirección de la máxima pendiente, esta variable afecta a la infiltración, la escorrentía y la aceleración y desaceleración del flujo, por lo tanto influye en la erosión y depositación de material en la superficie del terreno. (Londono, 2006).

Tabla 44: Rangos de las geoformas

Rango	Categoría Mapa Perfil	Categoría Mapa Planar
< -0,01	Cóncavo	Convexo
- 0,01 a 0,001	Plano	Plano
> 0,001	Convexo	Cóncavo

El mapa de curvatura resultante (ver Figura 103), conformado por, el mapa de curvatura perfil (Figura 102a) y el mapa de curvatura plana (Figura 102b). Esta variable se divide en nueve categorías como lo muestra la Tabla 45, que además, indica el porcentaje de área de la zona de estudio y los pesos asignados a cada clase para la evaluación de la amenaza.

Tabla 45: Clases de geoformas con sus respectivas áreas de ocupación en la zona de estudio y el peso asignado para la evaluación de la amenaza.

	Clases	Símbolo	%Área	Peso
Pisos inclinados	Plano plano	P-P	0,52	0,2
Valle inclinado	Cóncavo plano	C-P	0,06	0,6
Colinas inclinadas	Convexo plano	Cx-P	0,05	0,2
Cuenca abierta inclinada	Plano cóncavo	P-C	0,02	0,6
Cuenca cerrada inclinada	Cóncavo cóncavo	C-C	34,51	1
Cuenca protuberante inclinada	Convexo cóncavo	Cx-C	19,61	0,4
Colinas empotradas	Cóncavo convexo	C-Cx	14,07	0,4
Colinas infladas inclinadas	Convexo convexo	Cx-Cx	31,15	0

Las categorías de geoformas que más se observan en el mapa de curvatura (Figura 103) según las estadísticas que muestra la Figura 104 son las cóncava-cóncava, convexa-convexa, convexa-cóncava y cóncava-convexa con un porcentaje respecto al área total de 34,5 % 31,1 % 19,6 % y 14,0 % respectivamente,

y a su vez estas geoformas corresponden a características de cuencas cerradas inclinadas, colinas infladas inclinadas, cuenca protuberante inclinada y colinas empotradas respectivamente. Se observa además, que no hay zonas específicas de concentración, por el contrario, toda la zona muestra una distribución semejante de las clases de geoformas.

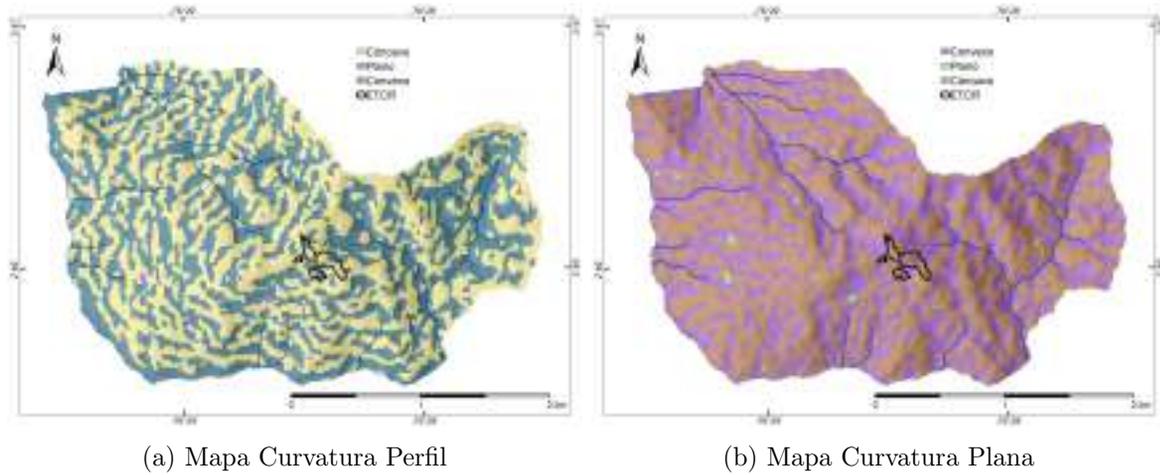


Figura 102: Mapa de Curvatura Perfil y Plana del antiguo ETCR Los Monos

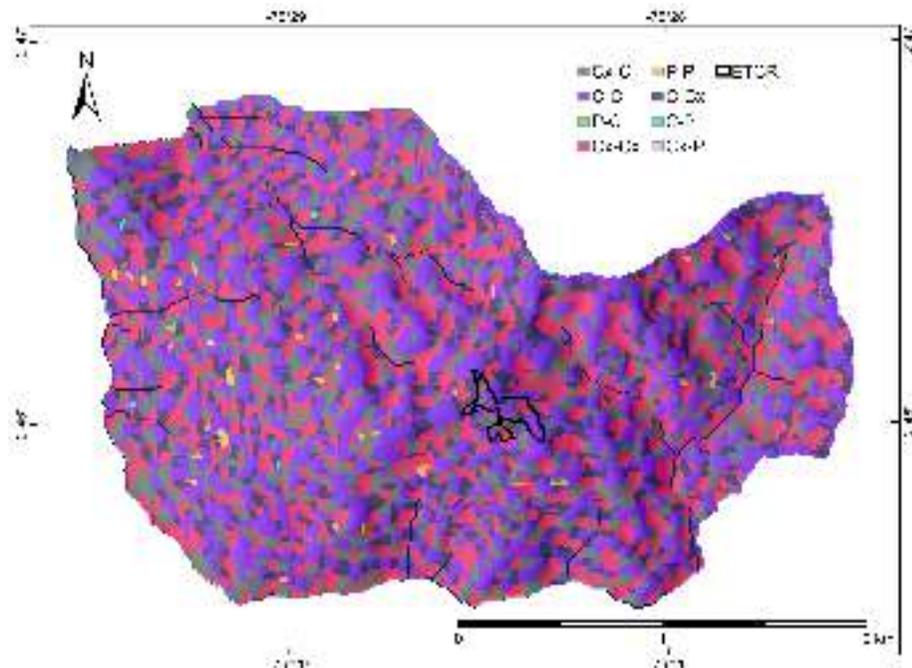


Figura 103: Mapa de Curvatura Los Monos

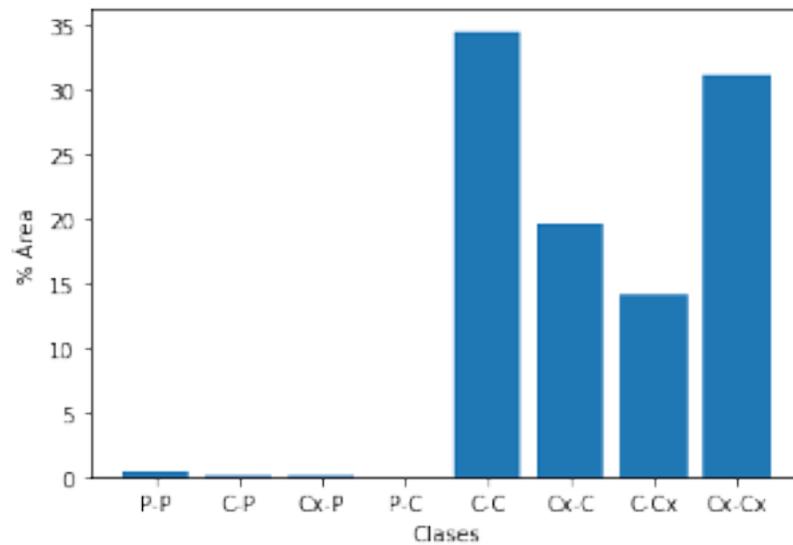


Figura 104: Gráfica de abundancia de Curvatura Los Monos

### 8.5.5. Mapa de susceptibilidad con AHP y asignacion directa

La Ecuación 8.4 indica el procedimiento matemático obtenido para el cálculo del mapa de susceptibilidad, donde el peso de las variables se obtuvo con AHP y el peso de las clases con la asignación directa:

$$IS = 22,3S + 7,5Cin + 6,1Cu + 2,8EAS + 10,6RR + 13,1TWI + 11,2Ec + 18,2Gs + 8,2DF \tag{8.4}$$

La Figura 105 presenta el mapa de susceptibilidad continua por movimientos en masa para el área de influencia del antiguo ETCR Los Monos.

### 8.5.6. Modelo de susceptibilidad

La Figura 106 presenta el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa en tres rangos para el área de influencia del antiguo ETCR Los Monos, tal y como se observa en la Tabla 46.

Tabla 46: Mapa de susceptibilidad, Los Monos.

Categoría	Área %
Baja	9,24
Media	79,24
Alta	11,73

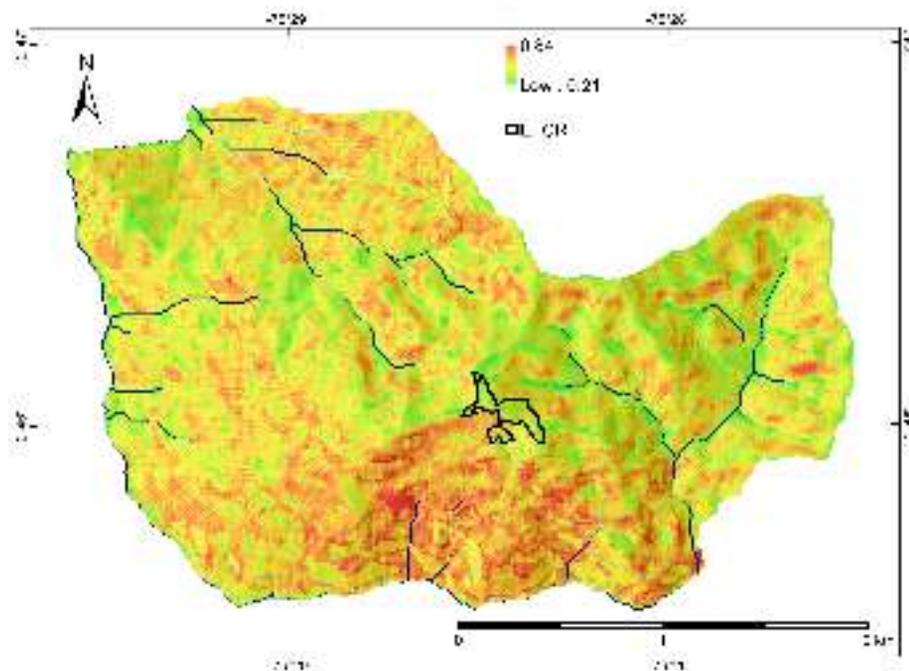


Figura 105: Mapa de susceptibilidad como variable continua por movimientos en masa del antiguo ETCR Los Monos

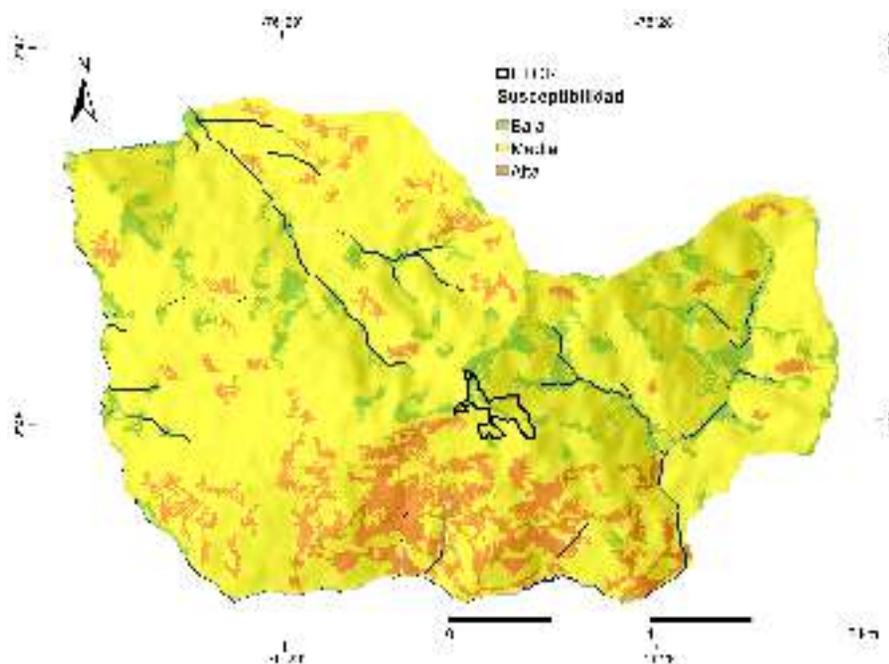


Figura 106: Susceptibilidad final por movimientos en masa.

## 8.6. Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia

### 8.6.1. SHALSTAB

SHALSTAB implementa el modelo hidrológico TOPOG (O’Loughlin, 1986), el cual utiliza la precipitación en estado estacionario para construir el patrón

espacial de humedad basado en el área aferente a cada punto, la pendiente y la transmisividad del suelo. La humedad del suelo es calculada como:

$$W = \frac{Qa}{bT \sin \theta} \quad (8.5)$$

Donde  $Q$  es la lluvia en condiciones estacionarias [ $mm/d$ ],  $a$  es el área de drenaje [ $m^2$ ],  $b$  es la longitud de cada celda [ $m$ ],  $T$  es la transmisividad del suelo en condiciones saturadas [ $m^2/d$ ], y  $\theta$  es la pendiente. Asumiendo que la transmisividad no varía con la profundidad, se puede entonces asumir:

$$W = \frac{h}{z_t} \quad (8.6)$$

Donde  $h$  es el espesor del suelo saturado y  $z_t$  el espesor total de suelo. Combinando las ecuaciones 8.5 y 8.6 se puede estimar la saturación relativa del perfil de suelo como:

$$\frac{h}{z_t} = \frac{Qa}{bT \sin \theta} \quad (8.7)$$

En términos del componente geotécnico, el modelo SHALSTAB está basado en análisis de equilibrio límite con talud infinito y el criterio de falla de Mohr-Coulomb.

$$\rho_s g z_t \sin \theta \cos \theta = c' + \left( \rho_s - \rho_w \frac{h}{z_t} \right) g z \cos^2 \theta \tan \phi \quad (8.8)$$

Donde  $\rho_s$  es la densidad del suelo,  $\rho_w$  es la densidad del agua,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $c'$  es la cohesión efectiva del suelo, y  $\phi$  es el ángulo de fricción. Reescribiendo la anterior ecuación en términos de la relación  $h/z$ :

$$\frac{h}{z_t} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) + \frac{c'}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} \quad (8.9)$$

Finalmente, acoplado el modelo hidrológico y el modelo de estabilidad se obtienen la siguiente ecuación:

$$\frac{a}{b} = \frac{T}{Q} \sin \theta \left[ \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) + \frac{c'}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} \right] \quad (8.10)$$

A partir de la ecuación 8.10 es posible determinar cuatro condiciones de estabilidad para cada celda de análisis. Las celdas donde la relación entre el área

de drenaje aferente y la longitud de la celda ( $a/b$ ) es mayor que la expresión al lado derecho de la ecuación corresponde a celdas inestables, en caso contrario son celdas estables. Las dos condiciones restantes corresponden a condiciones de estabilidad que no dependen de la lluvia. Las celdas estables en condiciones completamente saturadas de todo el perfil de suelo ( $h/z_t = 1$ ) son denominadas incondicionalmente estables y cumplen la siguiente condición:

$$\tan \theta < \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \tan \phi + \frac{c'}{\rho_s g z \cos^2 \theta} \quad (8.11)$$

Y las celdas inestables en condiciones secas ( $h/z_t = 0$ ) se denominan incondicionalmente inestables y cumplen la siguiente condición:

$$\tan \theta \geq \tan \phi + \frac{c'}{\rho_s g z \cos^2 \theta} \quad (8.12)$$

El modelo de SHALSTAB es implementado en la plataforma *Google Colab* mediante un algoritmo en lenguaje python (.ipynb), el modelo empleado esta basado en la formulación de la amenaza para deslizamientos superficiales detonados por lluvia propuesto por Montgomery y Dietrich (1994).

Los insumos requeridos en el modelo de estabilidad representan las características físicas del terreno y su distribución espacial. El modelo digital de elevación utilizado tiene una resolución espacial 12,5 m x 12,5 de la plataforma *ALOS PALSAR*. El mapa de profundidad de la capa del suelo fue elaborado mediante la metodología propuesta por Catani, Segoni, y Falorni (2010) *S model*. Se asumió profundidades menores a 3 m ( $h_{max}$ ) considerando que los deslizamientos son superficiales (Anderson y Sitar, 1995; Aristizábal, Martínez, y Veléz, 2010). Para determinar la distribución espacial del espesor de suelo deslizable  $Z$  a lo largo del área de estudio se empleo la ecuación 8.13 que se basa en la relación inversa de la pendiente con el espesor del suelo.

$$h_i = h_{max} \left[ 1 - \frac{\tan \theta_i \cdot \tan \theta_{min}}{\tan \theta_{max} \cdot \tan \theta_{min}} \cdot \left( 1 - \frac{h_{min}}{h_{max}} \right) \right] \quad (8.13)$$

Donde  $\theta_{max}$  y  $\theta_{min}$  corresponden a los valores máximos y mínimos de elevación o pendiente, mientras  $h_{max}$  y  $h_{min}$  son valores que restringen el espesor  $h_i$ .

La estimación de los parámetros geotécnicos, tales como; cohesión  $c'$ , ángulo de fricción  $\phi$ , peso unitario  $\gamma_s$ , y conductividad hidráulica saturada  $k_s$ , se asignaron a partir de las características texturales del suelo típico de cada material

identificado en la cuenca, considerando la descripción de las unidades geológicas presentadas por INGEOMINAS (2003) y los rangos de valores de parámetros geotécnicos recopilados en <http://www.geotechdata.info/parameter/>. En la Tabla 47 se presenta la parametrización geotécnica de cada unidad geotécnica homogénea en donde las propiedades de resistencia e hidráulicas se consideran constantes ajustada al tipo de suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS) correspondiente a las unidades geológicas superficiales (Figura 4) .

Tabla 47: Parámetros geotécnicos para las unidades geológicas superficiales

Unidad	Tipo de suelo	$c'$ (kPa)	$\phi^\circ$	$\gamma_s(kN/m^3)$	$k_s(m/s)$
PZ?ecm	SM	15	30	18	$5,4x10^{-6}$
QII	CL	14	28	19	$1,0x10^{-8}$
Qv	CL	16	28	19	$1,0x10^{-8}$

Los resultados de la amenaza para movimientos en masa son establecidos a partir de las condiciones de estabilidad descritas en la formulación del modelo; las categorías estables e inestable consideran la estabilidad de la celda sujeto al escenario de lluvia definido, mientras que las celdas incondicionalmente estables e inestables se establecen para condiciones saturadas y secas, respectivamente. En la Tabla 48 se presentan los eventos de lluvia a partir de las intensidades correspondientes a periodos de retorno de 10, 100 y 500 años. Se aclara que las intensidades se estiman para una duración asumida como el tiempo de concentración de la cuenca de la quebrada Nn.

Con fines a estimar una potencial avenida torrencial alimentada enjambres de movimientos en masa, se estima el volumen de sedimentos potencial a fallar en los diferentes periodos de retorno para las lluvias dadas en la Tabla 48. Este volumen se calcula para la subcuenca de la quebrada Gusano y de la cuenca Nn presentadas en las Figuras 107 a 109.

Tabla 48: Escenarios de lluvia establecidos para periodos de retorno ( $Tr$ ) de 10, 100 y 500 años.

$Tr$	Intensidad ( $mm/h$ )
10	113,65
100	149,93
500	177,20

En las Figuras 107, 108 y 109 se presentan la amenaza por movimientos en masa superficiales según las condiciones de estabilidad para cada escenario de

lluvia.

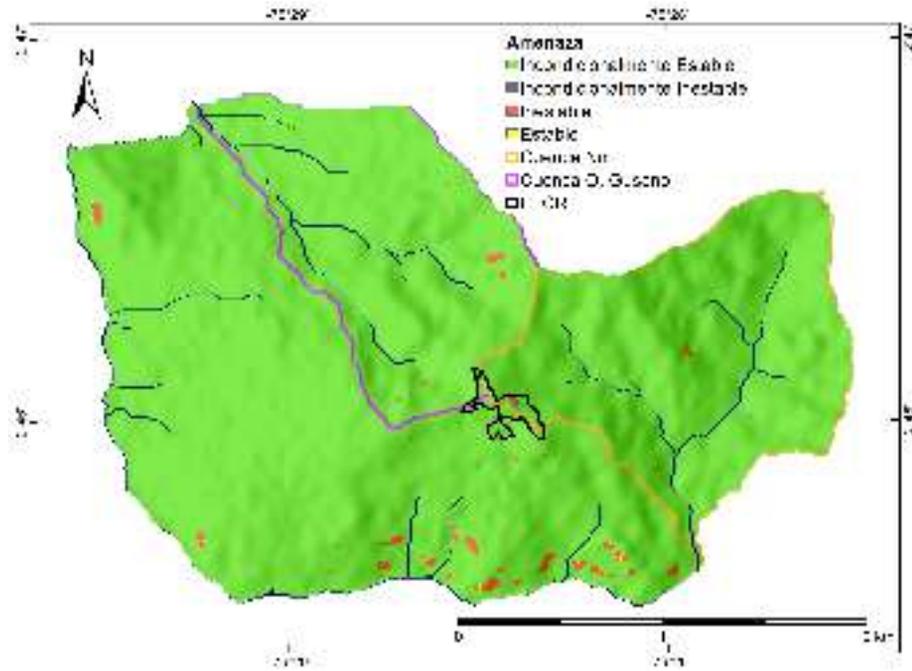


Figura 107: Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 10 años.

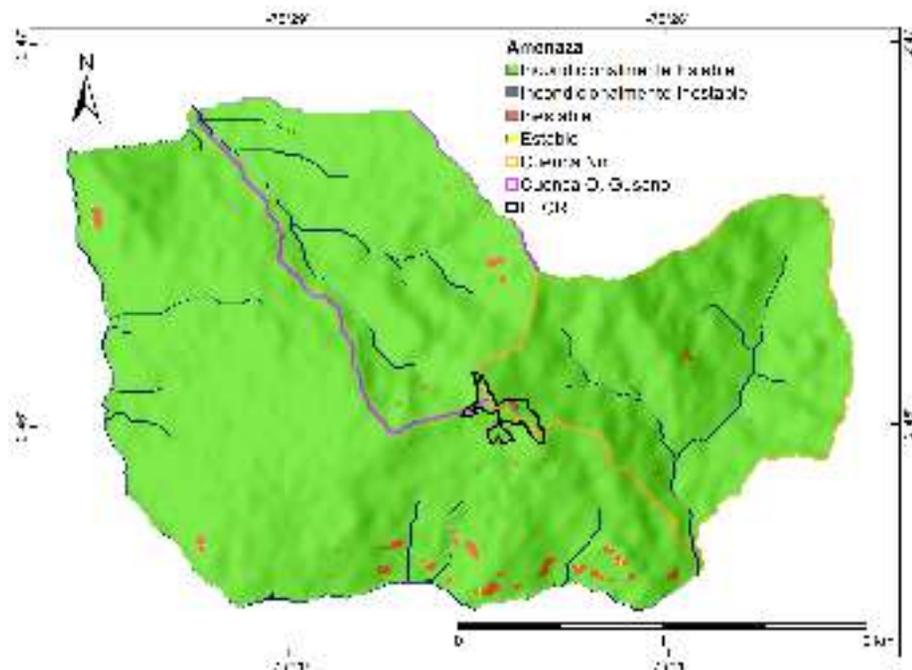


Figura 108: Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 100 años.

A partir de los resultados para las distintas intensidades de lluvia se observa

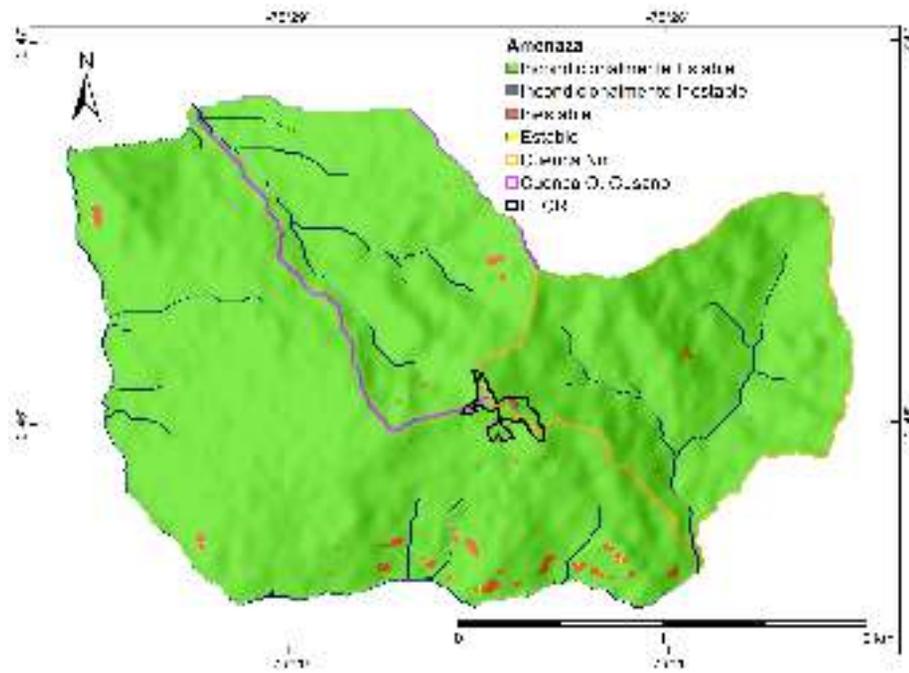


Figura 109: Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 500 años.

que las condiciones de inestabilidad se concentran en las zonas de mayor inclinación de las laderas ubicadas en el costado Sur de la cuenca, en el cual se han identificado algunos movimientos en masa inactivos Figura 78.

## 8.7. Amenaza por movimientos en masa detonados por sismo

### 8.7.1. Sismicidad histórica

El municipio de Caldon registra un histórico sísmico de 30 eventos entre jun/1995 y sep/2019, (Figuras 110 y 111) según el registro de sismicidad histórica de Colombia, además se presentan los sismos que mayores daños causaron (<http://sish.sgc.gov.co/>).

#### 8.7.1.1. Sismo del 6 de junio de 1994 (Mw=6,8)

Durante el evento sísmico los municipios más afectados fueron Páez (epicentro), Toribío, Inzá, Jambaló y Totoró, en el departamento del Cauca, algunas construcciones colapsaron, pero fueron los daños y efectos sobre la naturaleza los más severos. Grandes grietas en el terreno y movimientos en masa en zonas deforestadas y de agreste topografía fueron desencadenados por la superficiali-

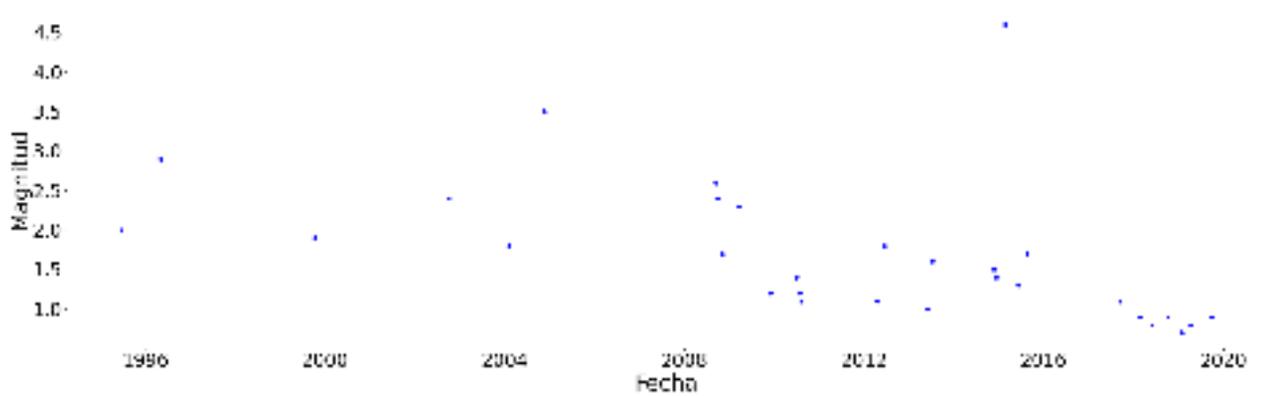


Figura 110: Registro sismicidad histórica municipio de Caldonó

dad del sismo y fuertes lluvias de la temporada. Siendo los daños ocasionados por el sismo menos severos que los ocasionados por los movimientos en masa. En el municipio de Caldonó el daño fue general con una intensidad de 7 (EMS-98). Una mujer resultó herida, colapsó una vivienda del área urbana y 51 viviendas averiadas en zona rural.

#### 8.7.1.2. Sismo del 9 de febrero de 2013 (Mw=7)

El sismo fue sentido en gran parte del país hasta ciudades ubicadas a más de 500 km del epicentro, los daños se reportaron en los departamentos de Cauca, Valle del Cauca y Nariño localización del municipio epicentro (Guaitarilla). Los daños observados se atribuyen a la vulnerabilidad de las construcciones las cuales presentaban mala calidad de materiales, cimentación en suelos arenosos, antigüedad de las viviendas y ausencia diseños según normativas. En el municipio de Caldonó el daño fue leve con una intensidad de 6 (EMS-98). Se presentaron 13 casas destruidas y 137 viviendas averiadas.

#### 8.7.2. Metodología - Bloque deslizando de Newmark

Según el SGC (2017b) la determinación de la amenaza por movimientos en masa detonados por sismo puede abordarse mediante análisis estadístico con la limitación de la existencia de un inventario de eventos o por medio de modelos físicos teniendo en cuenta una caracterización geotécnica detalla. La evaluación de la amenaza por movimientos en masa detonados por sismo se realiza mediante el método físico de (Newmark, 1965). El método se fundamenta en el modelo de estabilidad de clásico de talud infinito para determinar el factor de seguridad  $FS$ , este supone una superficie de falla plana infinitamente larga paralela a

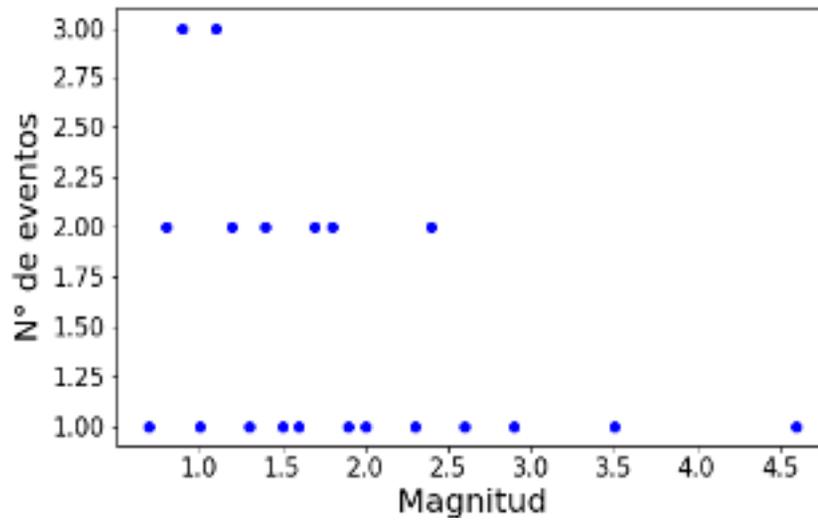


Figura 111: Sismicidad histórica municipio de Caldon

la superficie; el método permite analizar como una ladera podría comportarse durante un evento sísmico, mediante el calculo del desplazamiento de una masa considerando la aceleración crítica  $a_c$  como efecto de la carga sísmica y  $FS$ .

El método de Newmark realiza un análisis de estabilidad de la ladera como un bloque (masa) que se desliza por una superficie de falla bien definida e idealizada como un plano inclinado, considerando como unidad de análisis un elemento vertical de ancho  $b$  y altura  $z$ . El bloque se desplaza hacia abajo debido a la aceleración crítica rompiéndose el equilibrio estático entre el bloque y la superficie inclinada (Figura 112), (Jibson, Harp, y Michael, 2000).

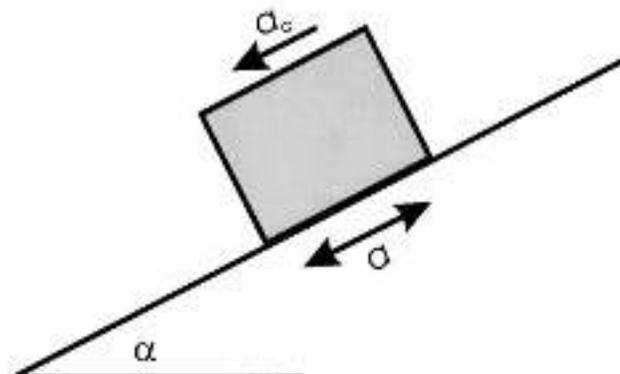


Figura 112: Bloque deslizante método de Newmark (Jibson y cols., 2000)

Durante un evento sísmico se genera un desplazamiento del bloque superando la fuerza cortante debido a una fuerza sísmica ( $a$ ) en la base, por lo que este se desplaza debido a la aceleración crítica la cual Newmark (1965) expresa en función del factor de seguridad estático y la geometría de la ladera.

$$a_c = (FS - 1) \cdot \sin \alpha \quad (8.14)$$

Donde  $FS$  es el factor de seguridad en condiciones estáticas y  $\alpha$  es el ángulo de inclinación de la ladera en grados.

Siguiendo la metodología expuesta por Jibson y cols. (2000) para la implementación del método de Newmark, tenemos que el factor de seguridad estático se calcula en cada unidad de análisis mediante equilibrio límite teniendo en cuenta el componente de la fricción y cohesión del material y la presión de poros.

$$FS = \frac{c'}{\gamma \cdot t \cdot \sin \alpha} + \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} - \frac{m \cdot \gamma_w \cdot \tan \phi'}{\gamma \cdot \tan \alpha} \quad (8.15)$$

Donde:

$c'$ : Cohesión efectiva [ $kPa$ ]

$t$ : Altura del elemento vertical [ $m$ ]

$\gamma$ : Peso específico del suelo [ $kNm^{-3}$ ]

$\gamma_w$ : Peso específico del agua [ $kNm^{-3}$ ]

$\alpha$ : Ángulo de inclinación de la ladera [ $^\circ$ ]

$m$ : Porción saturada de  $t$  [ $m$ ]

$\phi'$ : Ángulo de fricción efectiva [ $^\circ$ ].

Luego de obtener  $FS$  se calcula el desplazamiento de Newmark  $D_N$  en función de  $a_c$  para determinar la zonificación, teniendo en cuenta dos escenarios de ocurrencia de movimientos en masa ante sismo. (i) análisis de las laderas en condiciones secas y (ii) en condiciones saturadas, correspondiente a la condición más crítica.

$$\log D_N = 0,215 + \log \left[ \left(1 - \frac{a_c}{PGA}\right)^{2,341} \cdot \left(\frac{a_c}{PGA}\right)^{-1,438} \right] \pm 0,510 \quad (8.16)$$

Siendo  $PGA$  la aceleración máxima en el terreno. El análisis se realiza considerando el  $PGA$  más alto presentado por el SGC. Para el municipio de Caldono se presenta un rango de 0,3 a 0,5 considerando un periodo de retorno de 475 años con una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años ([https://srvags.sgc.gov.co/jsviewer/Amenaza\\_Sismica\\_2020/](https://srvags.sgc.gov.co/jsviewer/Amenaza_Sismica_2020/)).

Para el modelo de estabilidad es necesaria la representación de las características físicas del terreno y su distribución espacial. Se requiere el modelo de elevación digital el cual posee una resolución espacial de 12,5 m x 12,5 obtenido de la plataforma *ALOS PALSAR*. El mapa de espesor de la capa superficial del suelo  $Z$ , elaborado mediante la metodología propuesta por Catani y cols. (2010) *S model*. Se asumió profundidades menores a 3 m ( $h_{max}$ ) considerando los deslizamientos como superficiales (Anderson y Sitar, 1995; Aristizábal y cols., 2010). Determinando la distribución espacial del espesor de suelo deslizable  $Z$  mediante la ecuación 8.17 que se basa en la relación inversa de la pendiente con el espesor del suelo.

$$h_i = h_{max} \left[ 1 - \frac{\tan \theta_i \cdot \tan \theta_{min}}{\tan \theta_{max} \cdot \tan \theta_{min}} \cdot \left( 1 - \frac{h_{min}}{h_{max}} \right) \right] \quad (8.17)$$

Donde  $\theta_{max}$  y  $\theta_{min}$  corresponden a los valores máximos y mínimos de elevación o pendiente, mientras  $h_{max}$  y  $h_{min}$  son valores que restringen el espesor  $h_i$ .

La estimación de los parámetros geotécnicos, tales como: cohesión  $c'$ , ángulo de fricción  $\phi$ , peso unitario  $\gamma_s$  y conductividad hidráulica saturada  $k_s$ , se asignaron a partir de las características texturales del suelo típico de cada material identificado en la cuenca, considerando la descripción de las unidades geológicas presentadas por INGEOMINAS (2003) y los rangos de valores de parámetros geotécnicos recopilados en <http://www.geotechdata.info/parameter/>. En la Tabla 49 se presenta la parametrización geotécnica de cada unidad geotécnica homogénea en donde las propiedades de resistencia e hidráulicas se consideran constantes ajustada al tipo de suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS) correspondiente a las unidades geológicas superficiales (Figura 4).

La zonificación de la amenaza por movimientos en masa detonados por sismo

Tabla 49: Parámetros geotécnicos para las unidades geológicas superficiales

Unidad	Tipo de suelo	$c'$ (kPa)	$\phi^\circ$	$\gamma_s(kN/m^3)$	$k_s(m/s)$
PZ?ecm	SM	15	30	18	$5,4 \times 10^{-6}$
QII	CL	14	28	19	$1,0 \times 10^{-8}$
Qv	CL	16	28	19	$1,0 \times 10^{-8}$

se realiza a partir de lo presentado por Jibson y Michael (2009), categorizando la amenaza es en función de  $D_N$  de la siguiente manera:

- Amenaza Baja para las zonas con desplazamientos nulos y un máximo de 1 cm.
- Amenaza Media para las zonas con desplazamientos de 1 a 5 cm.
- Amenaza Alta para las zonas con desplazamientos superiores a los 5 cm.

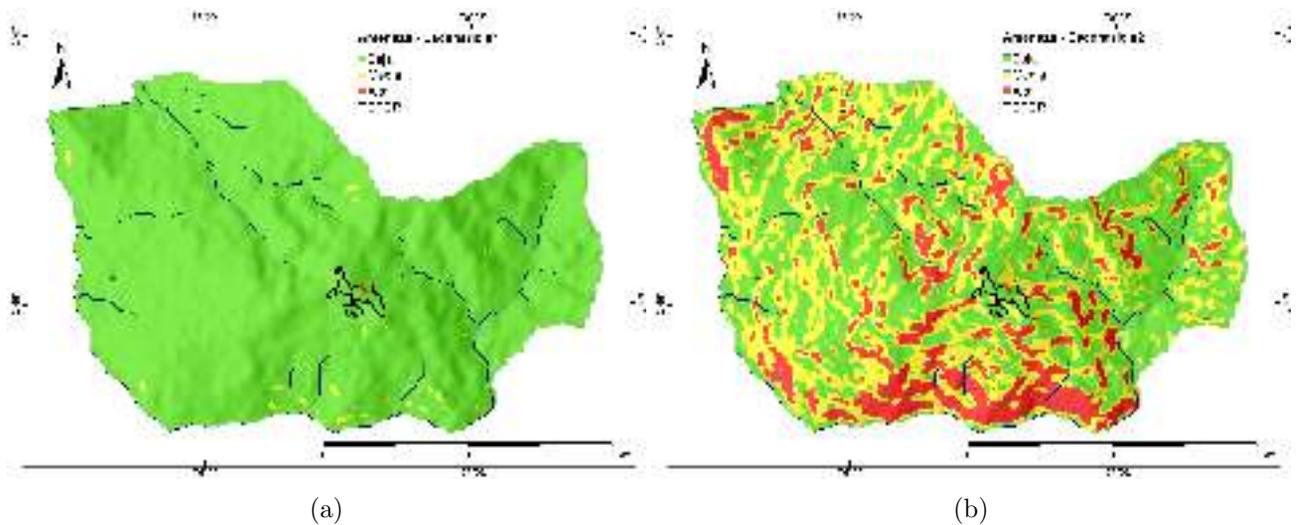


Figura 113: Amenaza por movimientos en masa detonados por sismo. a) Escenario #1 condición seca. b) Escenario #2 condición saturada.

En la La figura 113 se observa la amenaza por movimientos en masa detonadas por sismo. Las zonas clasificadas como amenaza alta aumentan en un 16 % en el análisis en estado saturado predominante en la zona Sur d el cuenca, la estabilidad de dichas zonas se encuentra arraigada a las pendientes superiores a los 30° (Figura 100); en estado seco solo se evidencia como amenaza alta un lleno antrópico localizado en la zona NW del antiguo ETCR (Figura 87b) y las zonas en amenaza baja se reducen de un 99,5 % a un 48,4 %.

## 8.8. Mapas de amenaza

Para obtener el mapa por movimientos en masa se cruza los tres escenarios evaluados: (i) susceptibilidad (AHP + asignación de peso directo) (ii) amenaza movimientos en masa detonados por sismos (Newmark), y (iii) amenaza movimientos en masa detonados por lluvia (SHALSTAB). Los tres mapas fueron cruzados conservando para cada celda la categoría de amenaza mayor, como criterio conservador. Para el caso de sismo como factor detonante, y el cual presenta dos escenarios (seco y húmedo), se utilizaron ambos, pero modificando la amenaza alta del escenario saturado a amenaza media. Ya que dicho valor representa un escenario extremo y con periodo de retorno cercano a 500 años. Para el mapa de amenaza por lluvia como factor detonante se conservaron las zonas incondicionalmente inestables e incondicionalmente estables como de amenaza alta y baja respectivamente. Y las celdas con un potencial de fallar ante diferentes escenarios de lluvia se definieron como de amenaza media. Esto permite considerar todos los periodos de retorno de la precipitación en dicho mapa. Es importante resaltar, como se explicó previamente, que dicho mapa corresponde a un escenario de lluvia intensa y que abarca espacialmente una micro-cuenca del área de influencia. Este escenario es poco probable que se desarrolle con dichas intensidades sobre toda la cuenca simultáneamente. Los gradientes de energía necesarios para este tipo de eventos convectivos se presenta en celdas de pocos kilómetros cuadrados. Sin embargo, si es posible que dichos eventos se presenten espacialmente en cualquiera de las microcuencas de la zona de influencia.

La Figura 114 presenta el mapa de amenaza por movimientos en masa combinando los diferentes escenarios del factor detonante.

Las áreas con amenaza alta por movimientos en masa ocupan el 11.8% del área total, especialmente en las zonas de alta pendiente en proximidades al río Ovejas, además en las zonas donde se presentan afloramientos de la roca metamórfica de bajo grado (PZ?ecm) la comunidad extrae el material de la roca para adecuar la vía y el suelo residual para la construcción de viviendas provocando movimientos en masa superficiales. Las áreas con amenaza media ocupan la mayor parte de la cuenca con el 79.3% del área total distribuido desde la parte alta hasta la parte media de la cuenca, asociado a zonas con pendientes moderadas y mayores y a las geoformas asociadas a perfiles de meteorización de una roca metamórfica de bajo grado (PZ?ecm). Las áreas con amenaza baja ocupan el 8.9% del área total, caracterizado por la presencia de pendientes

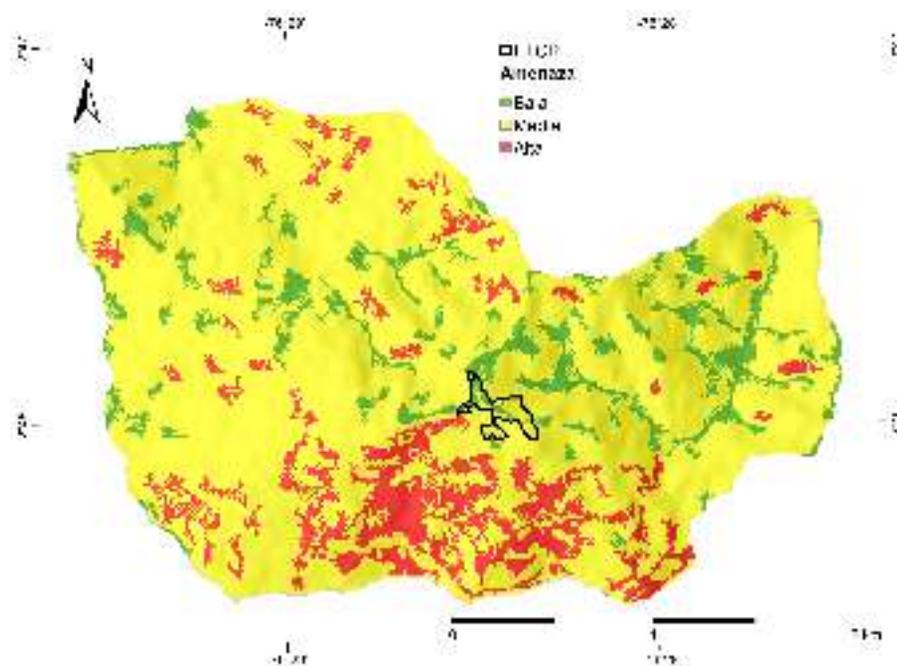


Figura 114: Mapa de amenaza estudio básico para movimiento en masa

suaves y planas. El polígono del antiguo ETCR Los Monos, presenta zonas con amenaza media y baja. La amenaza media se concentra hacia las zonas más altas, localizadas hacia el sur del polígono.

# Referencias

- Anderson, S. A., y Sitar, N. (1995). Analysis of Rainfall-Induced Debris Flows. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(12), 544–552. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1995\)121:7\(544\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1995)121:7(544))
- Aristizábal, E., Martínez, H., y Veléz, J. I. (2010). Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*, 34(53), 209–227.
- Ayalew, L., y Yamagishi, H. (2004). Slope failures in the blue Nile basin, as seen from landscape evolution perspective. *Geomorphology*, 57(1-2), 95–116.
- Bonham-Carter. (1994). Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS. *G.F.*, 398.
- Brabb, E. E. (1985). Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. En *International landslide symposium proceedings, Toronto, Canada* (Vol. 1, pp. 17–22).
- Caldono. (2005). *PLAN BÁSICO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL MUNICIPIO DE CALDONO* (Inf. Téc.).
- Carrara, A. (1983). Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 15(3), 403–426.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., y Reichenbach, P. (1991). GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth surface processes and landforms*, 16(5), 427–445.
- Catani, F., Segoni, S., y Falorni, G. (2010, 05). An empirical geomorphology-based approach to the spatial prediction of soil thickness at catchment scale. *Water Resources Research*, 46. doi: 10.1029/2008WR007450
- Chica, A. (1989). Apuntes de geotecnia: Curso de geotecnia y prácticas geotécnicas. , 1–120.
- CMGRD. (2014). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres* (Inf. Téc.). Caldono.
- CMGRD. (2017). *CONSEJO MUNICIPAL PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES – CMGRD, CALDONO, CAUCA*. (Inf. Téc. n.º 576). Descargado de [https://caqueta.micolombiadigital.gov.co/sites/caqueta/content/files/000623/31138{ }\\_pmgrd-florencia-final.pdf](https://caqueta.micolombiadigital.gov.co/sites/caqueta/content/files/000623/31138{ }_pmgrd-florencia-final.pdf)
- CRC. (2005). *Plan básico de ordenamiento territorial* (Inf. Téc.). Caldono.
- Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 43(1), 27–29.
- Cruden, D. M., y Hu, X. (1996). Hazardous modes of rock slope movement in the Canadian Rockies. *Environmental & Engineering Geoscience*, 2(4), 507–516.
- Dai, F., Lee, C., Li, J., y Xu, Z. (2001). Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environmental Geology*, 40(3), 381–391.
- Gilbert, M. A., González-Piqueras, J., y García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de teledetección*, 8(1), 1–10.
- Gruber, S., y Peckham, S. (2009). Land-surface parameters and objects in hydrology. *Developments*

- in Soil Science*, 33, 171–194.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., y Galli, M. (2006). Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, 81(1-2), 166–184.
- Hansen, A. (1984). Landslide hazard analysis. *Slope instability*, 523–602.
- Hansen, A., Franks, C., Kirk, P., Brimicombe, A., y Tung, F. (1995). Application of gis to hazard assessment, with particular reference to landslides in hong kong. En *Geographical information systems in assessing natural hazards* (pp. 273–298). Springer.
- INGEOMINAS. (2003). Geología de la Plancha 343 Silvia. , 106.
- Jibson, R. W., Harp, E. L., y Michael, J. A. (2000). A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. *Engineering Geology*, 58(3), 271 - 289. doi: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00039-9)
- Jibson, R. W., y Michael, J. A. (2009). Maps showing seismic landslide hazards in Anchorage, Alaska. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations*, 11p.
- Londono, J. (2006). *Evaluación holística de riesgo frente a deslizamientos en áreas urbanas andinas, universidad nacional de colombia, maestría en medio ambiente y desarrollo* (Tesis Doctoral no publicada). Tesis. Manizales.
- Meentemeyer, R. K., y Moody, A. (2000). Automated mapping of conformity between topographic and geological surfaces. *Computers & Geosciences*, 26(7), 815–829.
- Montgomery, D. R., y Dietrich, W. E. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water resources research*, 30(4), 1153–1171.
- Moore, I. D., Grayson, R., y Ladson, A. (1991). Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological processes*, 5(1), 3–30.
- Newmark, N. M. (1965). Effects of earthquakes on dams and embankments. *Géotechnique*, 15(2), 139–160. doi: 10.1680/geot.1965.15.2.139
- Olaya, V., Hengl, T., y Reuter, H. (2009). Geomorphometry—concepts, software, applications. *Developments in soil science*, 33, 141.
- O’Loughlin, E. M. (1986). Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resources Research*, 22(5), 794–804. doi: 10.1029/WR022i005p00794
- OSSO, y La RED. (2009). Guía Metodológica: DesInventar. , 1–24. Descargado de <http://www.desinventar.org>
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., y Guzzetti, F. (2018). *A review of statistically-based landslide susceptibility models* (Vol. 180) (n.º 2017). Elsevier B.V. Descargado de <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001> doi: 10.1016/j.earscirev.2018.03.001
- Rouse Jr, J. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation.
- Saaty, T. (1980). The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation: McGraw-hill. Inc. New York, NY.
- Sader, S., y Winne, J. (1992). Rgb-ndvi colour composites for visualizing forest change dynamics. *International journal of remote sensing*, 13(16), 3055–3067.
- SGC. (2013). Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1: 100.000. *Servicio Geológico Colombiano*, 2, 158.
- SGC. (2015). Sistema de Información de Movimientos en Masa. *Servicio Geológico Colombiano*, 35. Descargado de <http://simma.sgc.gov.co/>
- SGC. (2017a). *Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25000*. doi: 10.1002/chem.201301917
- SGC. (2017b). *GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1:25.000*.
- SGC y UIS. (2014). *Susceptibilidad Y La Amenaza Relativa Por Plancha 343 – Silvia Susceptibilidad*

*Y La Amenaza Relativa Por* (Inf. Téc. n.º 009). SGC.

- Soeters, R., y Van Westen, C. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation. *Landslides: investigation and mitigation*, 247, 129-177.
- Tovar, C. M. (2012). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasylva: revista internacional de silvicultura e industrias forestales*(238), 39-46.
- van Westen, C. J., Castellanos, E., y Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Eng. Geol.*, 102(3-4), 112-131. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010> doi: 10.1016/j.enggeo.2008.03.010
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *Special report*, 176, 11-33.
- Zhu, J., Miller, A. E., Lindsay, C., Broderson, D., Heinrichs, T., y Martyn, P. (2013). *Modis ndvi products and metrics user manual*. Version.

## Capítulo 9

# Amenaza por Inundaciones

### Introducción

Las inundaciones están asociadas a procesos hidrológicos de lluvias persistentes que aumentan el nivel de las aguas de escorrentía y pueden repercutir en eventos amenazantes. Estos eventos hacen parte de la dinámica de una corriente (IDEAM, 2014).

Para llevar a cabo la zonificación de la amenaza por inundación, se debe realizar una caracterización hidrológica de la cuenca hidrográfica objeto de estudio y la estimación de las descargas pico como respuesta a eventos de lluvias intensas, mediante parámetros morfométricos se estiman tiempos de concentración, luego con información de curvas intensidad – frecuencia – duración (IDF) se obtienen las intensidades de la tormenta de diseño para los diferentes períodos de retorno.

Es necesario posteriormente, realizar el tránsito hidrológico de la tormenta planteada a través de modelos lluvia escorrentía los cuales, para las cuencas objeto de estudio se proponen hidrógrafas unitarias.

### 9.1. Estudios previos

Para los casos específicos registrados por este tipo de eventos por inundación en el municipio de Caldon, se indica que estos han sido relativamente pocos, ya que la geomorfología del municipio no presenta zonas bajas o planas propicias para inundaciones y las características de sus cuencas con respecto a sus cauces principales no son de tipo meandrónico o sinuoso, pero en el documento *Consejo municipal para la gestión del riesgo de desastres – CMGRD- Caldon* (SGC y UIS, 2014) plantean que siempre existe un riesgo latente para este tipo de eventos por el desbordamiento de algunos ríos, por el taponamiento de redes de

acueducto y alcantarillado principalmente en el casco urbano.

## **9.2. Definición del área de influencia para la evaluación de la amenaza por Inundación**

Las inundaciones se presentan por emplazamiento paulatino o violento de las aguas y sedimentos en cantidades abundantes sobre una determinada superficie que normalmente no está sumergida, con duración, frecuencia, magnitud e intensidad determinada por la interacción entre el tipo de inundación y las características morfoestructurales y culturales del lugar, la manifestación de este evento de origen natural; algunos por su periodicidad, violencia y daños causados al hombre; se convierten en fuertes limitantes para los procesos antrópicos (Lage, 1997).

Las inundaciones se presentan por emplazamiento paulatino o violento de las aguas y sedimentos en cantidades abundantes sobre una determinada superficie que normalmente no está sumergida, con duración, frecuencia, magnitud e intensidad determinada por la interacción entre el tipo de inundación y las características morfoestructurales y culturales del lugar, la manifestación de este evento de origen natural; algunos por su periodicidad, violencia y daños causados al hombre; se convierten en fuertes limitantes para los procesos antrópicos.

Para la elaboración de los estudios básicos de amenaza por inundación inicialmente se procedió a definir una o varias áreas de influencia clasificadas por el comportamiento hidrológico que afecta el predio del antiguo espacio territorial Los Monos, lo que permite tener un acercamiento regional al área de interés, frente a la amenaza por inundación.

Los límites de afectación superficial por procesos hidrológicos de lluvias que hacen que aumente de manera diferencial el nivel de las aguas de escorrentía de esta unidad básica de estudio son establecidos inicialmente utilizando los cambios definitivos de pendiente que forman depresiones claramente visibles en el terreno, tales cambios superficiales suelen ser cuchillas y drenajes. Está área es posteriormente ajustada considerando las unidades geológicas superficiales y sus estructuras.

Debido a las ubicación espacial del antiguo ETCR Los Monos, se hace necesario distinguir dos cuencas por separado denominadas Cuenca NN y la cuenca correspondiente a la quebrada Gusano, cada una de ellas tiene condiciones particulares que hace necesaria su estudio de manera independiente.

La Cuenca NN, se encuentra ubicada hacia el este del antiguo ETCR Los

Monos, con un área de 175,6 hectáreas incluidas todas en el municipio de Caldon (ver Figura 115), tiene alturas que van desde los 2050 msnm hasta los 1830 msnm aproximadamente y su control hidrológico es ejercido por el río Salado, la quebrada Gusano se encuentra hacia el noroeste del área del antiguo ETCR de los Monos con una extensión de 146,21 hectáreas (ver Figura 116), las zonas con mayor altura son compartidas con la Cuenca NN y sus zonas más bajas que alcanzan a llegar a los 1.535 metros aproximadamente están ubicadas al este. Hacia la parte alta de la montaña en donde se ubica el antiguo ETCR, se presenta una divisoria con pendientes de altas a moderadas, por tal razón es propensa a movimientos en masa causados por la saturación de los suelos en temporadas húmedas.

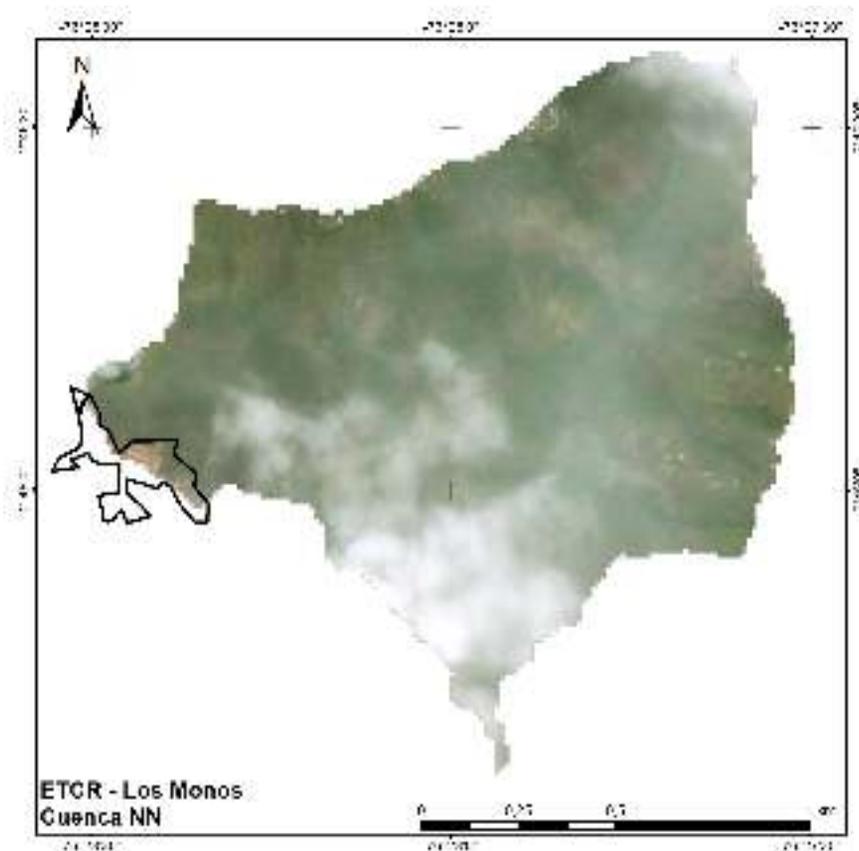


Figura 115: Localización de la Cuenca NN en el área de influencia del antiguo ETCR Los Monos

### 9.3. Catálogo histórico de eventos

La realización del inventario histórico por inundaciones, toma como base de datos los registros disponibles para el municipio de Caldon en las plataformas del Sistema de Inventario de Desastres (DesInventar) (Sección 8.4.1), con el fin

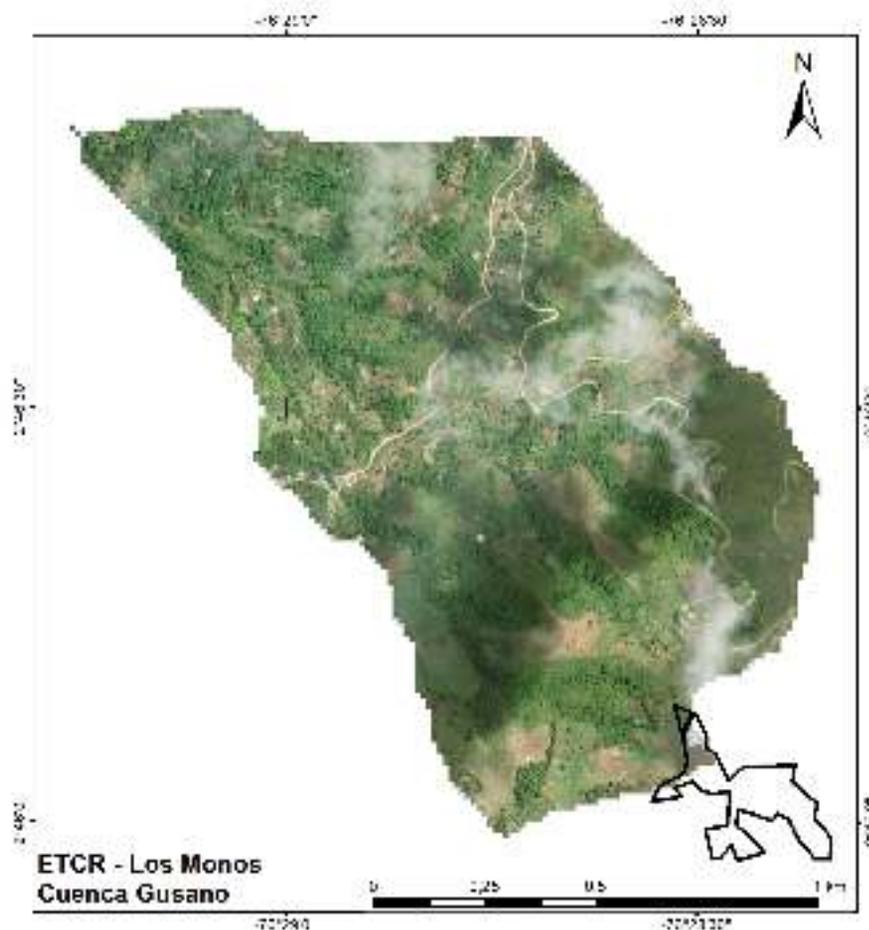


Figura 116: Localización de la quebrada Gusano en el área de influencia del antiguo ETCR Los Monos

de dar una mirada en la morfodinámica regional asociada al antiguo ETCR Los Monos. Durante el periodo comprendido entre 1971 y el primer trimestre del año 2017, el municipio de Caldoño registró en el catálogo del DesInventar 6 eventos de tipo inundación, lo cual representa el 21,4% de los reportes (teniendo en cuenta solo eventos tipo movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales) y han afectado a cerca de 23.250 personas.

#### 9.4. Estimación de caudales máximos

Para determinar la amenaza por inundación es importante entender el comportamiento hidrológico de la región, para ello se busca estimar caudales pico ya que estos son determinantes para la estimación de variables hidráulicas a partir de las cuales se construyen las manchas de inundación.

### 9.4.1. Tiempos de concentración

Con el fin de determinar la duración de la tormenta de diseño con la cual se proyecta la hidrógrafa, se calcula el tiempo de concentración, el cual se define como el tiempo que tarda una gota de agua en llegar desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de salida (Smith y Vélez, 1997).

El tiempo de concentración depende de las características morfométricas de la cuenca y para su estimación se han desarrollado múltiples ecuaciones empíricas. En este estudio se considera el promedio obtenido mediante las expresiones mostradas en la Tabla 50.

Tabla 50: Expresiones para calcular el tiempo de concentración

Método	Ecuación	Parámetros
Kirpich	$t_c = 0,0078L_p \cdot S^{0,385}$	$t_c$ : Tiempo de concentración [minutos] $L_p$ : Longitud del cauce principal [pies] $S$ : Pendiente promedio del cauce principal [m/m]
Témez	$T_c = 0,3 \left[ \frac{L}{S^{0,5}} \right]^{0,76}$	$T_c$ : tiempo concentración [horas] $L$ : Longitud del cauce principal [Km] $S$ : Pendiente promedio del cauce principal [m/m]
Passini	$T_c = \frac{0,108(A \cdot L)^{1/3}}{S^{0,5}}$	$T_c$ : tiempo concentración [horas] $A$ : Área de la cuenca [Km <sup>2</sup> ] $L$ : Longitud del cauce principal [Km] $S$ : Pendiente promedio del cauce principal [m/m]
Gianndotti	$T_c = \frac{4\sqrt{A+1,5L}}{25,3\sqrt{S \cdot L}}$	$T_c$ : tiempo concentración [horas] $A$ : Área de la cuenca [Km <sup>2</sup> ] $L$ : Longitud del cauce principal [Km] $S$ : Pendiente promedio del cauce principal [m/m]
California	$t_c = 60 \left[ \frac{0,87075L^3}{H} \right]^{0,385}$	$t_c$ : Tiempo de concentración [minutos] $L$ : Longitud del cauce principal [Km] $H$ : Diferencia de cotas entre la divisoria y la salida de la cuenca [m]
Clark	$T_c = 0,335 \left[ \frac{A}{S^{0,5}} \right]^{0,593}$	$T_c$ : Tiempo de concentración [horas] $A$ : Área de la cuenca [Km <sup>2</sup> ] $S$ : Pendiente promedio del cauce principal [m/m]

Los valores de tiempo de concentración estimados para el antiguo ETCR Los Monos se presentan en la Tabla 51.

Tabla 51: Tiempos de concentración

AETCR	Cuenca	Tiempo de Concentración [minutos]						
		Témez	Kirpich	California	Passini	Giandotti	Clark	tc
Los Monos	Cuenca NN	46,12	16,65	13,14	33,30	48,83	58,70	36,12
	Qda. Gusano	28,48	7,96	7,20	14,79	25,42	35,88	19,96

### 9.4.2. Curvas Intensidad - Duración - Frecuencia

Para calcular la intensidad de la lluvia de diseño se cuenta con las curvas Intensidad, duración y Frecuencia (IDF) de las estaciones pluviográficas de la red nacional de monitoreo del IDEAM. La intensidad de diseño para cada cuenca se calcula como la intensidad obtenida de las curvas IDF para una duración igual al tiempo de concentración.

Las estaciones pluviográficas de las cuales se obtienen las curvas Intensidad – Frecuencia – Duración para los diferentes períodos de retorno en las cuencas hidrográficas se muestran a continuación en la Figura 117, a partir de éstas se obtienen por interpolación espacial usando el método de distancia inversa ponderada *IDW* las curvas correspondiente al área de interés. Las curvas IDF obtenidas para la Cuenca NN se muestran en la Figura 118 mientras que para la qda. Gusano se muestran en la 119

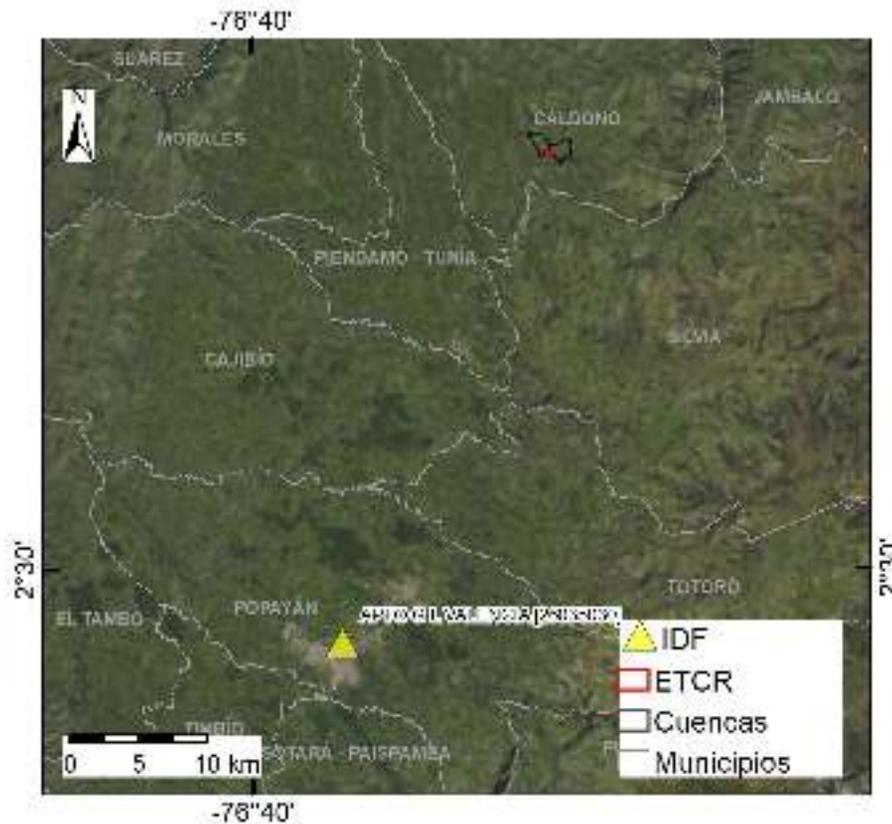


Figura 117: Ubicación de Estaciones Pluviograficas

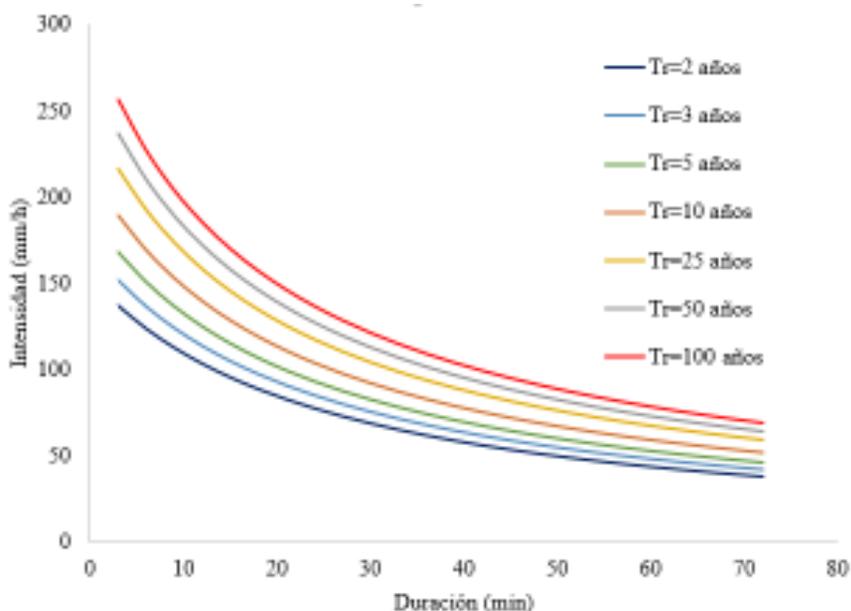


Figura 118: Curvas IDF Los Monos Cuenca NN

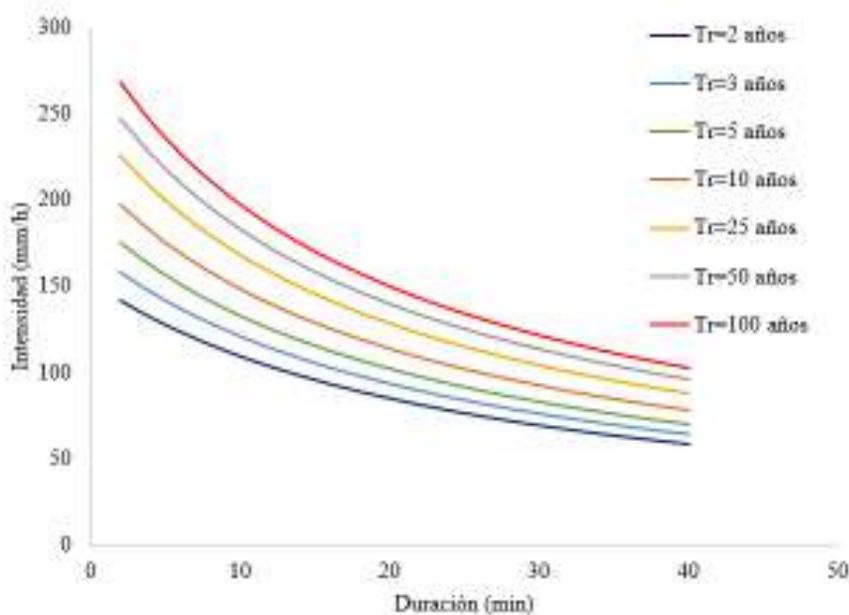


Figura 119: Curvas IDF Los Monos Qda. Gusano

### 9.4.3. Distribución temporal de la tormenta de diseño

Una vez obtenidas las intensidades y láminas de lluvia para los diferentes períodos de retorno en cada una de las cuencas hidrográficas se procede a obtener el hietograma de la tormenta de diseño, para esto se distribuye temporalmente la lluvia con ayuda el diagrama de Huff (Vargas, 1985) para 50% de

porcentaje de excedencia, las curvas de distribución temporal de la tormenta de diseño se presentan a continuación en la Figura 120.

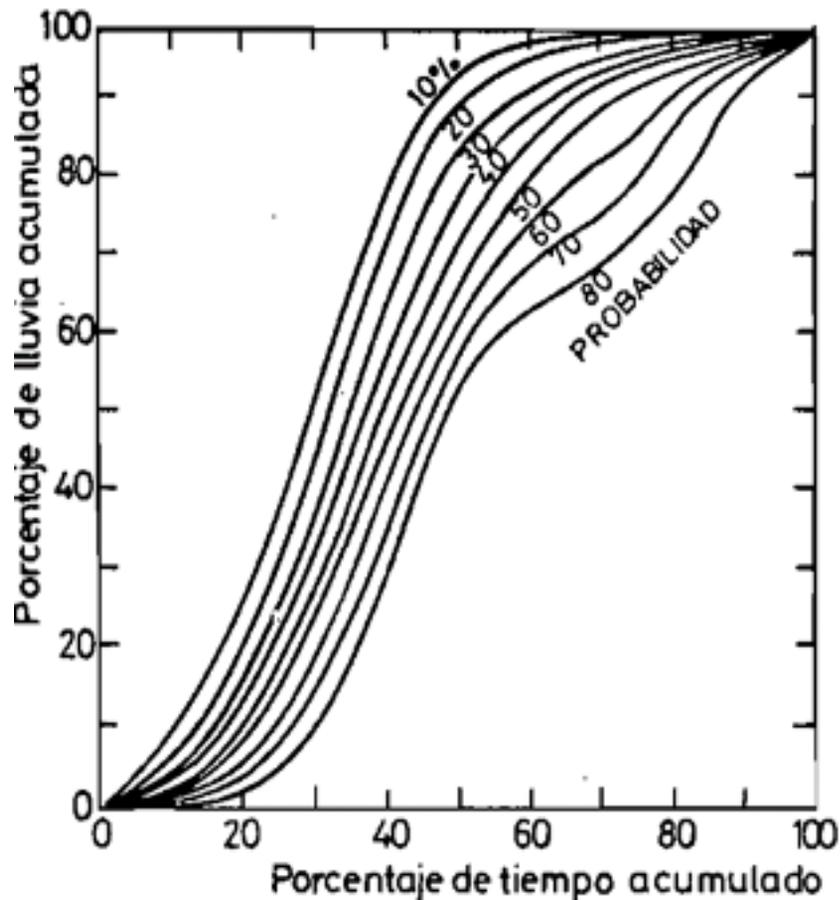


Figura 120: Diagrama de Huff para grupo de tormentas II

El histograma de lluvia distribuida para período de retorno de 100 años se presenta a manera de ejemplo a continuación en la Figura 121 para la Cuenca NN.

#### 9.4.4. Estimación de la infiltración

De la lluvia que cae sobre la cuenca en un evento de precipitación intensa, solo una parte se convierte directamente en escorrentía superficial, la parte restante se intercepta por la vegetación, es almacenada en depósitos o se infiltra en el terreno, a este segundo grupo se le conoce con el término de pérdidas hidrológicas y su estimación es fundamental para la el cálculo de caudales pico mediante modelos lluvia escorrentía.

Para la estimación de las pérdidas hidrológicas se utiliza la metodología de abstracción inicial ( $I_a$ ) para representar el agua que no es susceptible de ser

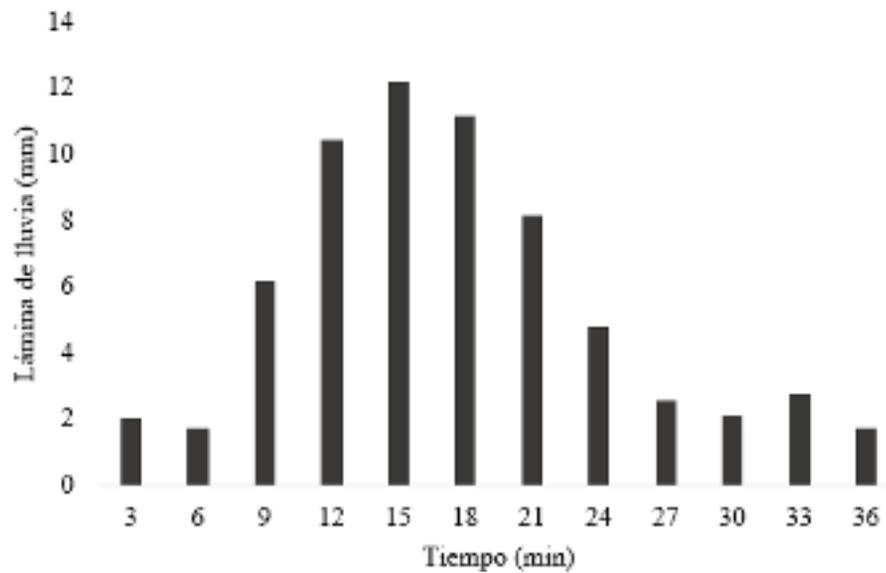


Figura 121: Histograma de precipitación de diseño Cuenca NN Tr=100 años

infiltrada o escurrida superficialmente, como lo es el agua interceptada por la vegetación. La infiltración es calculada mediante la suposición de que la capacidad de infiltración es constante para todo evento de lluvia y se estima a partir del índice de infiltración media  $\phi$ . La abstracción inicial se calcula según la metodología del número de curva del *Soil Conservation Service (SCS)*, la cual está dada según la Ecuación 9.1.

$$S \text{ [mm]} = \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \cdot 25,4 \quad I_a = 0,2S \quad (9.1)$$

Donde  $S$  es la capacidad de almacenamiento máximo de la cuenca  $I_a$  es la abstracción inicial y  $CN$  es el número de curva. El número de curva refleja el grado de impermeabilidad del suelo y es función del tipo y la humedad del suelo y de las coberturas vegetales que lo recubren (Chow, Maidment, y Mays, 1994). El índice  $\phi$  o capacidad media de infiltración se definió de acuerdo al trabajo de (Montoya y Patiño, 2001), trabajándose así con un índice  $\phi = 10$  mm/h para la zona rural. A continuación, en las Tablas 52, 53. se presenta el valor ponderado del número de curva  $CN$  para la Cuenca NN y la quebrada Gusano respectivamente y en la Tabla 54 se presenta el valor del coeficiente de infiltración y abstracción inicial del suelo para ambas cuencas.

Tabla 52: Estimación del número de curva de la Cuenca NN

<b>Cuenca NN</b>			
Cobertura	Área [Km <sup>2</sup> ]	% Área	CNII
Bosque	0,725	41,56	70
Pastos	0,816	46,75	74
Suelo desnudo	0,195	11,17	82
Urbano	0,009	0,51	90
CNII Ponderado			73

Tabla 53: Estimación del número de curva de la qda. Gusano

<b>Gusano</b>			
Cobertura	Área [Km <sup>2</sup> ]	% Área	CNII
Bosque	0,916	62,97	70
Pastos	0,454	31,20	74
Suelo desnudo	0,082	5,66	82
Urbano	0,003	0,17	90
CNII Ponderado			72

Tabla 54: Parámetros de pérdidas por infiltración

AETCR	Cuenca	Ia [mm]	$\phi$ [mm/h]
Los Monos	Cuenca NN	18,49	10,00
	Q. Gusano	19,79	10,00

### 9.4.5. Hidrógrafa unitaria

Se utiliza como modelos de transformación de lluvia en escorrentía el hidrograma unitario sintético de Clark (USGS, 2016), que conceptualiza la cuenca como un modelo de embalse lineal, considerando los tiempos de viaje desde los diferentes puntos de la cuenca hasta la salida de esta a mediante un histograma de área-tiempo. La transformación de la lluvia en escorrentía se realiza con ayuda del software HECHMS 4.2 (USACE, 2016).

Las variables de entrada para estimar los caudales máximos de cada cuenca aplicando las hidrógrafas unitarias de Clark, son el tiempo de concentración y el coeficiente de almacenamiento de cada una. El coeficiente de almacenamiento se estima mediante la metodología propuesta por USGS (2016) según la Ecuación 9.2.

$$R = 16,4L^{0,342}S^{-0,790} \tag{9.2}$$

Donde  $R$  es el coeficiente de almacenamiento en horas,  $L$  representa la longitud de la cuenca a través del cauce principal y hasta la divisoria en millas y

$S$  la pendiente longitudinal del cauce principal en pies por millas.

A continuación, en la Tablas 55 y 56 se presentan los caudales máximos estimados para los diferentes períodos de retorno en las zonas de interés del antiguo ETCR. El caudal de 500 años es estimado mediante extrapolación con regresión logarítmica  $Q$  vs Tiempo de retorno ( $Tr$ ).

Tabla 55: Caudales máximos para diferentes tiempos de retorno de la Cuenca NN

Cuenca NN								
Tr [años]	2	3	5	10	25	50	100	500
QMáx [m <sup>3</sup> /s]	14,1	17,2	20,5	24,8	30,4	34,5	38,5	48,7

Tabla 56: Caudales máximos para diferentes tiempos de retorno de la quebrada Gusano

Qda. Gusano								
Tr [años]	2	3	5	10	25	50	100	500
QMáx [m <sup>3</sup> /s]	10,6	14,5	18,7	24,3	31,5	36,6	41,5	54,7

### 9.5. Zonificación de manchas de inundación a escala de cuenca

La estimación de manchas de inundación a escala de cuenca se realiza a partir los diferentes caudales máximos. Las manchas de inundación se zonifican a partir del descriptor geomorfológico HAND por sus siglas en inglés *Height Above Nearest Drainage*, el cual es una normalización del DEM de acuerdo con la distancia vertical relativa al drenaje más cercano siguiendo las direcciones de drenaje. Asociado con niveles de inundación definidos a partir de curvas de calibración (nivel vs caudal).

La obtención del HAND parte de la red de drenaje, el mapa de direcciones de flujo y el DEM, estos dos primeros mapas permiten identificar la celda destino sobre la red de drenaje de cualquier celda, lo que permite calcular la elevación relativa como la diferencia entre la elevación de una celda determinada y la elevación de su celda destino sobre el canal. En la Figura se ilustra la obtención del HAND (Rennó y cols., 2008).

Se utiliza como curva de calibración la regionalización de geometría hidráulica desarrollada por Mejía y Posada (2002) para ríos de montaña a través del análisis de diferentes bancos de datos en todo el país. La expresión para la curva de calibración viene dada por la Ecuación 9.3:

$$H = 0,517Q^{0,335} \qquad \text{Ríos de montaña} \qquad (9.3)$$

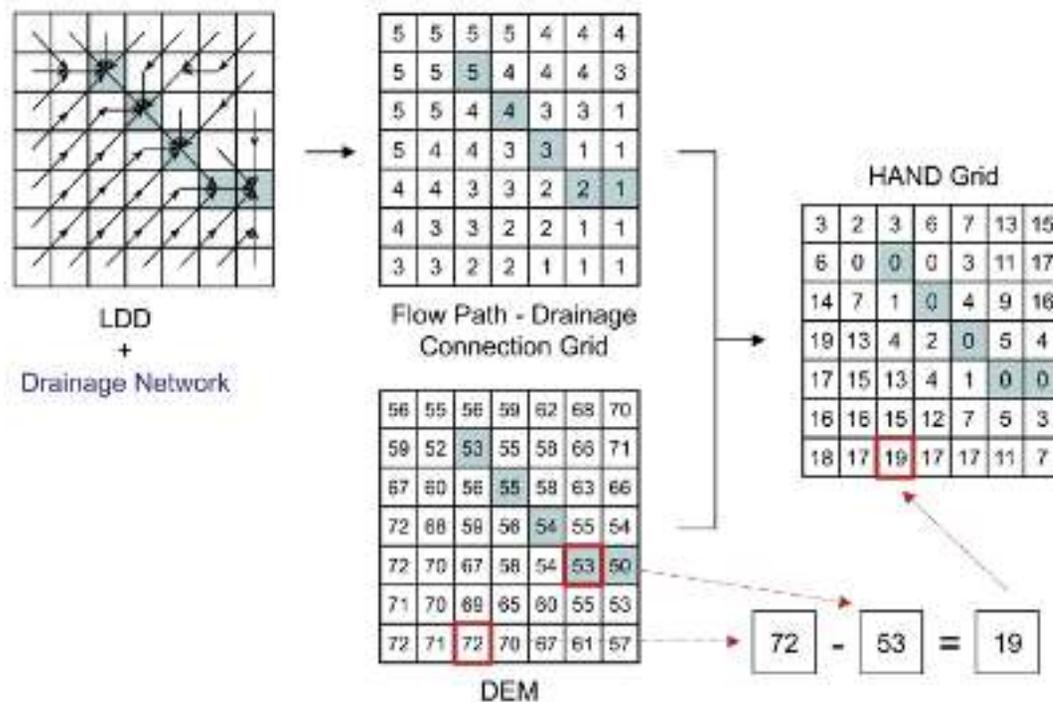


Figura 122: Descripción HAND, fuente: (Rennó y cols., 2008)

A continuación, en las Figuras 123 y 124 se presenta el descriptor geomorfológico HAND para las Cuenca NN y Gusano respectivamente. En la Figura 125 el calado resultante de la distribución del caudal máximo distribuido en la red de drenaje a manera de ejemplo en la Cuenca NN para 500 años de período de retorno.

Con el fin de definir los diferentes niveles de amenaza se establecen las zonas inundables para diferentes períodos de retorno en relación a la probabilidad de ocurrencia de la siguiente manera:

- Amenaza baja asociada al período de retorno de 500 años
- Amenaza media asociada al período de retorno de 100 años
- Amenaza alta asociada al período de retorno de 10 años.

En la Figura 126 se muestra la zonificación de amenaza por inundación para el área de estudio. Si bien en los resultados se obtienen los tres niveles de amenaza (alta, media y baja) por cuestiones de la escala mínima cartografiable solo se observa en este caso nivel de amenaza alta.

Se tiene que de las zonas con potencial de amenaza por inundación el 100 % de estas se encuentran en nivel alto esto se debe a la baja sensibilidad de la

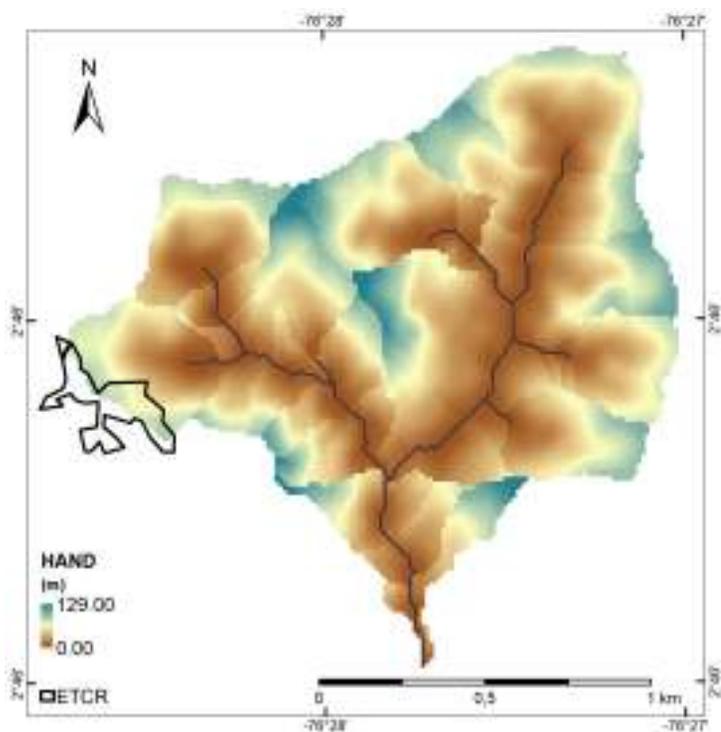


Figura 123: HAND Cuenca NN

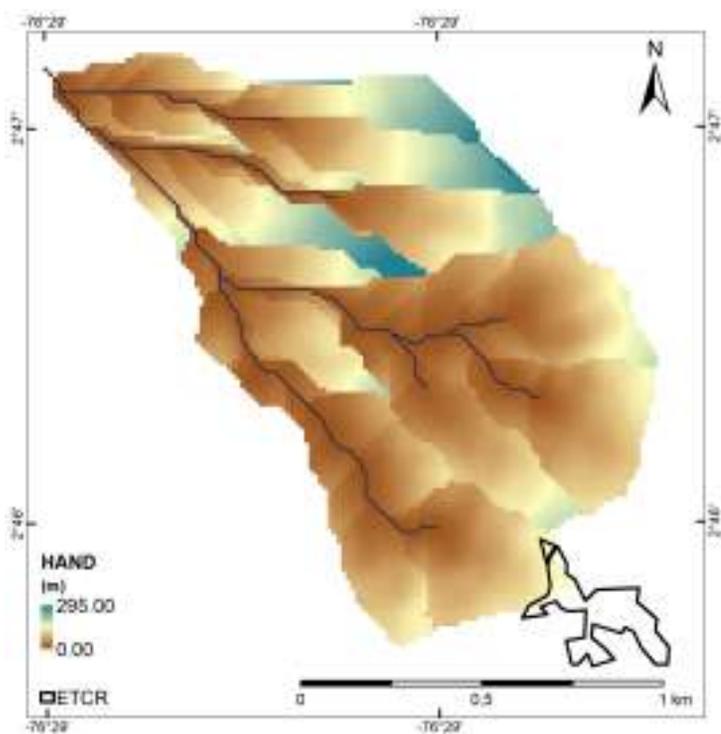


Figura 124: HAND Qda. Gusano

metodología frente a la escala de trabajo, por su parte el antiguo ETCR no

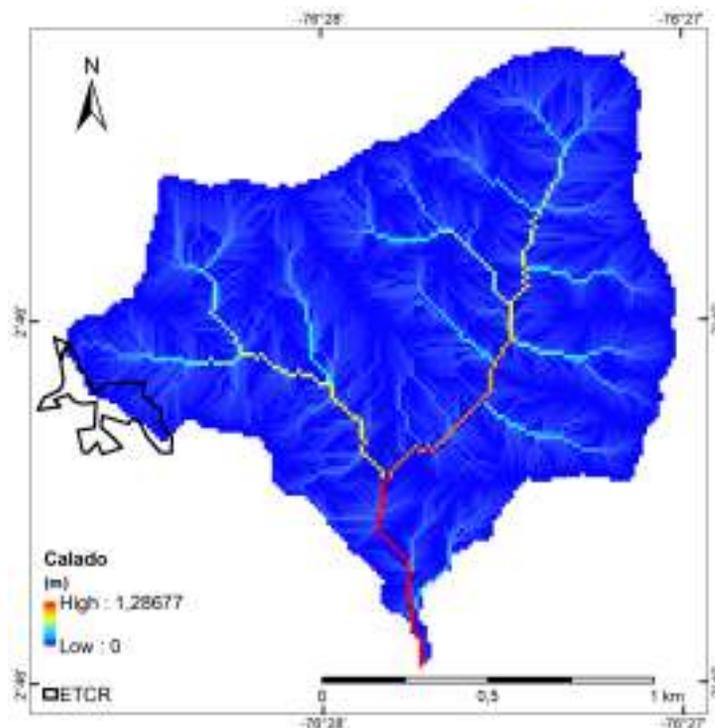


Figura 125: Ejemplo - calado Cuenca NN

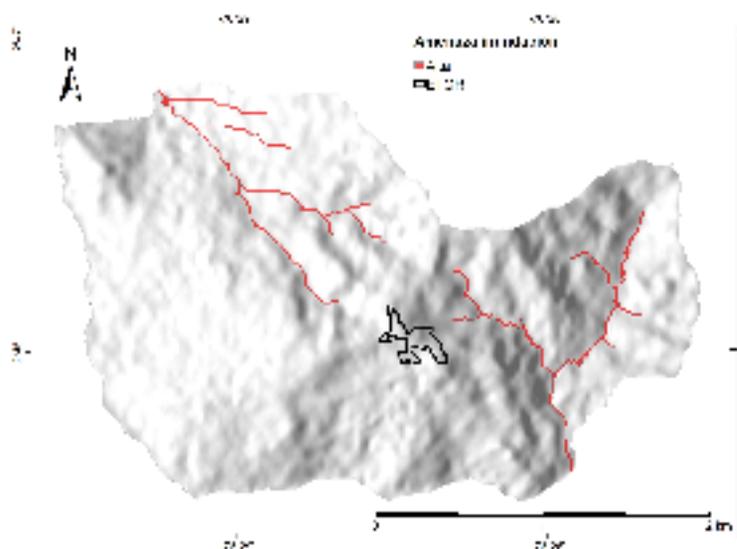


Figura 126: Zonificación de amenaza estudio básico para inundación

se encuentra aparentemente influenciado por ninguna corriente que se pueda apreciar a esta escala ya que se ubica cerca de la cabecera de las cuencas aquí estudiadas. Es importante dar a entender que el objetivo de este tipo de modelación es identificar las corrientes que puedan representar una amenaza por inundación para el antiguo ETCR, sin embargo no posee la escala adecuada

para definir una zonificación, para esto se realizan los estudios de detalle donde se incluye el apartado de inundación.

# Referencias

- Chow, V. T., Maidment, D. R., y Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*.
- IDEAM. (2014). Estudio Nacional del Agua 2014.
- Lage, M. S., Antonio Flórez and Bejarano. (1997). Génesis y manifestaciones de las inundaciones en Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 6(1), 60–110.
- Mejía, y Posada. (2002). GEOMETRÍA HIDRÁULICA PARA CORRIENTES ESTABLES DE LA ZONA ANDINA COLOMBIANA. *XV SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA – MEDELLÍN 2002*.
- Montoya, J. J., y Patiño, J. E. (2001). Estudio hidrometeorológico y geomorfológico de diez quebradas del Valle de Aburrá. *Universidad EAFIT*.
- Rennó, C. D., Nobre, A. D., Cuartas, L. A., João Vianei Soares, M. G., Hodnett, J. T., y Waterloo, M. J. (2008). HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*.
- SGC y UIS. (2014). *Susceptibilidad Y La Amenaza Relativa Por Plancha 343 – Silvia Susceptibilidad Y La Amenaza Relativa Por* (Inf. Téc. n.º 009). SGC.
- Smith, R., y Vélez, M. V. (1997). *Hidrología de Antioquia*. Medellín.
- USACE. (2016). Hydrologic Engineering Center, Hydrologic Modelling System HEC-HMS. User's Manual (version 4.2, August 2016). *Hydrologic Engineering Center*(August).
- USGS. (2016). Equations for Estimating Clark Unit-Hydrograph Parameters for Small Rural Watersheds in Illinois. *Water-Resources Investigations Report 00-4184*.
- Vargas, E. (1985). Influencia del hidrograma de una tormenta en la crecida resultante. *Universidad Católica de Chile*.

## Capítulo 10

# Amenaza por Avenidas Torrenciales

### Introducción

Las avenidas torrenciales se definen como flujos formados por una mezcla de agua y sedimentos en diferentes proporciones, que se desplaza a grandes velocidades a lo largo de cauces en cuencas de montaña, y que tienen como causas detonantes la presencia de uno o varios de los siguientes eventos: lluvias concentradas intensas o lluvias antecedentes; enjambre de movimientos en masa; sismos; rotura de presas naturales o artificiales; o aporte de grandes volúmenes de agua por deshielo (Aristizábal, Carmona, y López, 2020). Se caracterizan por su alta capacidad destructiva y tiempos de respuesta muy cortos para la toma de acciones por parte de la población expuesta (Borga, Stoffel, Marchi, Marra, y Jakob, 2014).

Existen tres factores fundamentales que intervienen en la amenaza de una cuenca a generar avenidas torrenciales: la morfometría de la cuenca, la disponibilidad de sedimentos y disponibilidad de agua. Las dos primeras determinan la susceptibilidad, y la disponibilidad de agua establece la amenaza (Figura 127). La morfometría determina la respuesta torrencial de una cuenca, la disponibilidad de sedimentos modifica el comportamiento reológico del fluido y aumenta su capacidad destructiva y, finalmente, la lluvia aporta los volúmenes de agua necesarios para conformar un flujo.

En el presente trabajo se realizará un análisis considerando eventos de lluvia extremos como detonantes.

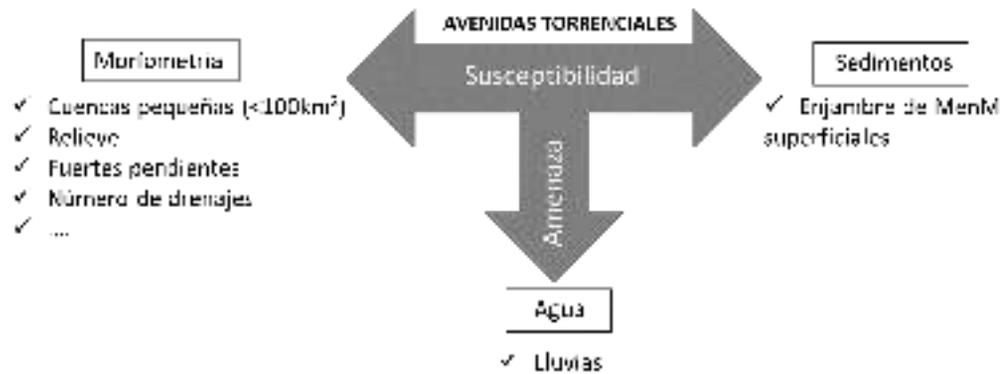


Figura 127: Diagrama conceptual de la evaluación de la amenaza por avenidas torrenciales.

### 10.1. Estudios previos

En la revisión del documento *Consejo municipal para la gestión del riesgo de desastres – CMGRD- Caldono* (SGC y UIS, 2014) indican que este tipo de eventos son muy recurrentes debido a las características del relieve. Aunque todo el territorio municipal es susceptible a sufrir las avenidas torrenciales, hay zonas que presentan un mayor riesgo por la morfometría de algunas cuencas ubicadas principalmente en la zona de la cordillera donde las lluvias son de carácter torrencial. han registrado este tipo de eventos sobre el Río Ovejas, provocando afectación a las infraestructuras sobre el sector pueblo nuevo, la vía Caldono - Siberia, Puente Narváz Sector Monterilla, además de la afectación de los cultivos ubicados en la periferia del Río.

### 10.2. Definición del área de influencia para la evaluación avenidas torrenciales

La evaluación de avenidas torrenciales depende de la respuesta de una cuenca hidrográfica ante eventos de lluvia y el aporte de sedimentos, lo que hace de gran importancia definir la unidad territorial que alberga condiciones capaces de incidir en comportamientos hidrológicos de los cauces.

Para la elaboración de los estudios básicos de amenaza por avenidas torrenciales se procede a definir dos áreas de influencia clasificadas por el comportamiento hidrológico y morfodinámico que afecta el predio del espacio territorial Los Monos, lo que permite tener un acercamiento regional al área de interés, frente a la amenaza por avenidas torrenciales. En la Figura 128 se presentan las dos cuencas delimitadas como áreas de influencia por avenidas torrenciales para el espacio territorial Los Monos. La cuenca A tiene un área de 176 ha. El

área de la cuenca B es de 146 ha.

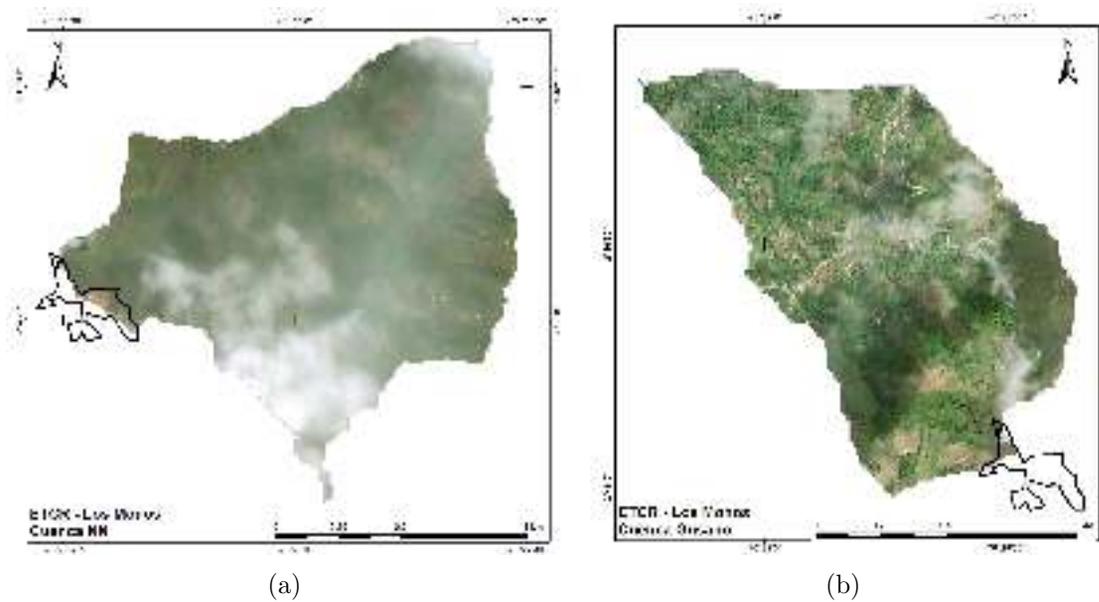


Figura 128: Cuencas los Monos

### 10.3. Evaluación de la susceptibilidad por avenidas torrenciales a nivel de cuenca

#### 10.3.1. Análisis morfométrico

Para el análisis de las características y comportamiento de la cuenca hidrográfica se determinaron los principales parámetros morfométricos para la cuenca, relacionados con los drenajes, la geometría y forma de la cuenca, así como de su textura y las características del relieve. En la Tabla 64 se observan los índices morfométricos con sus respectivas ecuaciones.

##### 10.3.1.1. Parámetros relacionados a la red de drenaje

El estudio cuantitativo de redes de drenaje fue iniciado por Horton (1945), quien propuso un esquema de ordenamiento para la red de drenaje, el cual fue revisado posteriormente por Strahler (1957), quien lo mejoró. Este sistema de ordenamiento es el más usado en hidrología actualmente (Mantilla, Mesa, y Poveda, 1998) y el que se adoptó para la realización de este trabajo.

**Orden del cauce principal ( $S_u$ ).** Este será el máximo orden que hayan alcanzado los drenajes, usando el método de Strahler (1957), además, este será el orden de la cuenca. El orden de la cuenca permite hacer una aproximación

de que tantos contribuyentes tiene el cauce principal.

**Número de drenajes (Nu).** Es el total de la suma de todas los drenajes pertenecientes a la cuenca según su orden u. Esto último es importante porque de igual forma, se debe tener registro del número de drenajes para cada orden existente en la cuenca por separado.

**Longitud de los drenajes (Lu).** Es el total de la suma de la longitud de los drenajes de orden u. Esto último es importante porque de igual forma, se debe tener registro de las longitudes de drenajes para cada orden existente en la cuenca por separado. Este parámetro se obtiene en km.

**Longitud del cauce principal (C1).** Está dada por la suma de longitudes de los cursos que componen el cauce principal. Este cauce es el de mayor importancia de la cuenca, debido a que es allí, donde drenan los demás cauces de orden inferior.

**Relación de longitud de los drenajes Rl o Lur.** Se define como la relación que existe entre la longitud media de canales fluviales de un orden determinado y la longitud media de canales de orden inmediatamente superior. Fue estudiada por primera vez por Horton (1945) y en base a este parámetro el autor enunció la “ley de la longitud media de canales fluviales”. Rl tiene un rango de  $1,5 \leq Rl \leq 3,5$  (Huanca, 1999).

**Relación de bifurcación (Rb).** Representa la relación existente entre el número de drenajes de un orden dado y los del orden inmediatamente superior. Esta relación es generalmente constante en todos los órdenes de cursos de agua. Fue expresado por primera vez por Horton (1945).

Con base a este parámetro, él enunció la “ley del número de canales fluviales”. La relación de bifurcación de una cuenca natural en una roca homogénea se mueve en un rango de  $3 \leq Rb \leq 5$  (Huanca, 1999).

Gil (2009) analizó que los valores bajos (valores cercanos a 2) suelen corresponder a cuencas de menor pendiente mucho más planas. Según Senciales González (1999) las altas relaciones de bifurcación indican áreas de fuertes pendientes con rápida concentración de la escorrentía, pero con picos de crecida poco importantes y los bajos valores suelen presentar los más altos riesgos de inundación por concentración brusca de la escorrentía. En las cuencas naturales, los valores cercanos a 2 revelan áreas de escaso relieve, valores entre 3 y 5 corresponde a áreas de montaña sin demasiado control estructural y valores superiores a 5 indican fuerte dependencia de lo estructural.

**Coefficiente  $\rho$ .** Definido por Horton (1945), corresponde al cociente entre RL

y  $R_B$ . Este coeficiente ha sido considerado de gran importancia para estimar la capacidad de almacenamiento hídrico de la red de drenaje, el cual a su vez es fundamental en la modulación de las intensidades de la cresta de inundación (Horton, 1945). Si  $\rho$  es elevado, la mayor longitud de los cursos de orden superior facilitará el almacenamiento en el cauce durante las crecidas, lo que se traducirá en una atenuación de los efectos erosivos de la descarga (Ferrando, 2015).

Ahora bien, para comprender si el valor de  $\rho$  es elevado o no, debemos acudir a su relación con  $R_b$  y  $R_l$ .  $R_b$  es inversamente proporcional a  $\rho$ , es decir, entre más grande sea el valor de  $R_b$ , menos elevado será el valor de  $\rho$ . Además  $R_b$  tiene un rango de resultados para cuencas naturales  $3 \leq R_B \leq 5$ . Así pues, se puede decir que si el valor de  $R_b$  es próximo a 3 entonces  $\rho$  tendrá un valor elevado y por el contrario si  $R_b$  es próximo a 5,  $\rho$  tendrá un valor bajo.

### 10.3.1.2. Parámetros relacionados a la geometría y forma de la cuenca.

Los factores geológicos principalmente, son los encargados de moldear la fisiografía de una región y particularmente la forma que tienen las cuencas hidrográficas. La forma interviene de manera importante en las características de descarga de los drenajes asociados, particularmente en los eventos de avenidas máximas y condiciona las velocidades de escorrentía superficial. La medición de los factores de forma de una cuenca se realiza por medio de una metodología que permite cubrir dos objetivos. El primero, es que permite comparar la forma de la cuenca con figuras geométricas conocidas; el segundo, es que permite comparar los resultados de las mediciones, los cuales son adimensionales, con los obtenidos en otros estudios en los que se puede tener mayor información histórica del comportamiento hidrológico.

**Longitud de la cuenca ( $L_b$ ).** Se define como la distancia horizontal desde la desembocadura de la cuenca hasta otro punto aguas arriba donde la tendencia general del río principal corte la línea de contorno de la cuenca (Ordóñez, 2011).

**Área ( $A$ ).** Está definida como la proyección horizontal de toda la superficie de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural (Ordóñez, 2011). Corresponde a la superficie del terreno delimitado por una divisoria de aguas, este parámetro se expresa generalmente en  $\text{km}^2$ .

**Perímetro ( $P$ ).** Se expresa como la longitud en un plano horizontal de la divisoria de aguas. Este parámetro se mide en unidades de longitud y se expresa

en km (Ordóñez, 2011).

**Factor forma (Ff).** Formulado por Horton (1945), este parámetro es la relación entre el área y el cuadrado de la longitud de la cuenca. Intenta medir qué tan alargada puede ser una cuenca. Los valores con un factor de forma bajo, indican que la cuenca está menos sujeta a crecientes que una de la misma área y mayor factor de forma. La Tabla 57 representa una clasificación del Ff asociado a una cuenca.

Tabla 57: Características de la cuenca de acuerdo con el valor Ff

<b>Ff</b>	<b>Clasificación</b>
< 0,22	muy alargada
0,22 - 0,30	Alargada
0,20 - 0,37	Ligeramente alargada
0,37 - 0,45	Ni alargada ni ensanchada
0,45 - 0,60	Ensanchada ligeramente
0,60 - 0,80	Ensanchada
0,80 - 1,20	Muy ensanchada
> 1,20	Rodeando el desagüe

**Relación de Elongación (Re).** Schumm (1956) estableció este parámetro como la relación entre el diámetro de un círculo con igual área que la de la cuenca y la longitud máxima de la misma. Según Summerfield (1991) para un número importante de cuencas, valores cercanos a 1 indican que la cuenca es plana, y para el rango establecido entre  $0,5 \leq Re \leq 0,8$  la cuenca es de relieve pronunciado.

**Relación de circularidad (Rc).** El coeficiente o relación de circularidad de Miller se calcula a partir del área y el perímetro de la cuenca. Los valores varían entre 0 y 1. En este caso, valores cercanos a 1 indican morfologías ensanchadas, mientras que unos coeficientes de circularidad cercanos a 0, indican que las cuencas son alargadas

**Coeficiente de compacidad (Cc).** También conocido como coeficiente de Gravelius, se define como la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de área de la cuenca hidrográfica (Schumm, 1956). El coeficiente está relacionado estrechamente con el tiempo de concentración, que es el tiempo que tarda una gota de lluvia en moverse desde la parte más lejana de la cuenca hasta la salida. Según el valor que tome este coeficiente, la cuenca tendrá diferente forma. La Tabla 58 muestra tres categorías para la clasificación, de acuerdo con este parámetro:

Tabla 58: Características de la cuenca de acuerdo con el valor de Cc.

Clase de Forma	Indice de Compacidad	Forma de la Cuenca
Clase I	1 - 1,25	Casi redonda a oval - redonda
Clase II	1,26 - 1,5	Oval - redonda a oval - oblonga
Clase III	1,51 o más de 2	Oval - oblonga a rectangular - oblonga

**Relación de textura (Rt).** Según Schumm (1956), la relación de textura es un factor importante en el análisis morfométrico de drenaje que depende de la litología subyacente, la capacidad de infiltración y el aspecto de relieve del terreno. La relación de textura se expresa como la relación entre las corrientes de primer orden y el perímetro de la cuenca.

**Relación de aptitud (Rf).** Según Melton (1957), la relación entre la longitud del canal principal y la longitud del perímetro de la cuenca es la relación de aptitud, que es una medida de la aptitud topográfica.

**Wandering ratio (Rw).** Según Smart y Surkan (1967) *Wandering ratio* se define como la relación entre la longitud del drenaje principal y la longitud del valle. Este último es la distancia en línea recta entre la salida de la cuenca y el punto más alejado de esta.

### 10.3.1.3. Parámetros relacionados a la textura de la cuenca.

La textura del drenaje está relacionada con la superficie externa de la cuenca, esta depende fundamentalmente de la permeabilidad del suelo y el volumen de agua disponible para penetrarlo en un tiempo determinado, además de otros factores como el clima, el tipo de litología, estructuras geológicas presentes, factores biológicos y la topografía. Los factores previamente mencionados confluyen y crean así un conjunto de características que modifican el entorno hidrológico. (Worschitz, 2014)

**Frecuencia de Drenaje (Fs).** De acuerdo con Horton (1945) es el cociente entre la sumatoria total del número de drenajes y su área en km<sup>2</sup>. Las redes de drenaje densas tienden a tener unos índices de frecuencia de drenaje altos, es decir, una mayor frecuencia por unidad de área permite una más rápida organización y concentración del escurrimiento, lo cual conduce a una mayor prontitud en la evacuación de las aguas en la cuenca. En la Tabla 59 se categoriza el Fs según el valor resultante (Somashekar, Ravikumar, Sowmya, Dar, y Ravikumar, 2011).

**Densidad de Drenaje (Dd).** Su cálculo consiste en dividir la longitud

Tabla 59: Características de la cuenca de acuerdo con el valor Fs

<b>Fs</b>	<b>N° Drenajes / Km<sup>2</sup></b>
Bajo	0 - 5
Moderado	5 - 10
Moderado - Alto	10 - 15
Alto	15 - 20
Muy Alto	20 - 25

total de todos los drenajes por la superficie, considerada en este caso como su área, representando así una medida de longitud por unidad de superficie y en consecuencia constituye una medida de disección (Horton, 1945). La Tabla 60 describe las magnitudes dadas para los rangos de Dd.

Tabla 60: Características de la cuenca de acuerdo con el valor Dd

<b>Dd</b>	<b>Descripción</b>
1	Bajo
1,01 - 2	Moderado
2,01 - 3	Alto
> 3	Muy Alto

Para valores de Densidad de Drenaje se tiene lo siguiente (Ordóñez, 2011):

#### **Menor densidad de drenaje:**

- Materiales del terreno resistentes a la erosión y suelos muy permeables.
- Pendientes suaves.

#### **Mayor densidad de drenaje:**

- Mayor potencial de erosión.
- Suelos impermeables.
- Pendientes fuertes y escasa cobertura vegetal.

Cuanto mayor sea la densidad de drenaje, será más rápida la respuesta de la cuenca frente a un evento torrencial de gran dimensión, ya que este índice permite tener un mejor conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca.

**Constante de Mantenimiento de Canal (C).** Este parámetro se define como el inverso de la densidad de drenaje. Puede interpretarse como el área necesaria para que haya una unidad de longitud de cauce, es decir, representa la cantidad de área disponible que existe para la alimentación y abastecimiento de cada canal fluvial (Schumm, 1956).

Entre más alto sea el índice C más grande será la permeabilidad de las rocas de la cuenca. Valores menores a un rango de 0,3 reflejan poca infiltración, baja permeabilidad, pobre cobertura vegetal y suelos débiles menos resistentes a la erosión. Valores en un rango mayor a 0,5 reflejan mayor infiltración, más alta permeabilidad, mejor cobertura vegetal y rocas más resistentes a la erosión. Los valores intermedios entre 0,3 y 0,5 se toman con las mismas características pero moderadas (Sakthivel, Jawahar Raj, Sivasankar, Akhila, y Omine, 2019).

**Intensidad de Drenaje (Di).** Faniran (1968) define la intensidad de drenaje, como la relación entre la frecuencia de drenaje ( $F_s$ ) y la densidad de drenaje ( $D_d$ ). El bajo valor de la intensidad de drenaje, implica que la densidad de drenaje y la frecuencia de drenaje tienen poco efecto en la medida en que la superficie ha sido afectada y reducida por agentes denudacionales.

**Número de Infiltración (If).** El número de infiltración de una cuenca es el producto de la densidad de drenaje ( $D_d$ ) y la frecuencia de Drenaje ( $F_s$ ) (Faniran, 1968). Es un parámetro que da una idea de las características de infiltración de la cuenca. Los valores más altos del número de infiltración indican menor infiltración y mayor escorrentía. Menores números de infiltración indican mayor infiltración y menor escorrentía (Prabhakaran y Jawahar Raj, 2018).

**Coefficiente de Torrencialidad (Ct).** Se determina a partir de la relación entre el número total de cursos de primer orden ( $N_1$ ) y el área total de la cuenca. A mayor número de cursos de primer orden y menor área, la torrencialidad de la cuenca será mayor (Díaz & López, 1987). Es un indicador de la erodabilidad lineal y la capacidad de descarga de una cuenca. Debido a que los cursos de primer orden son de génesis erosiva, altos valores indican elevada susceptibilidad a la erosión, menor tiempo de llegada y alta torrencialidad. En otras palabras, los cursos de orden 1 son los de mayor importancia en la generación de flujos torrenciales y de inundaciones aluvionales veloces (Busnelli y Horta, 2014). Este parámetro permite interpretar el comportamiento del flujo de agua en la cuenca.

**Longitud del flujo superficial (Lg).** Se define como la longitud mínima requerida para hacer fluir una capa de agua sobre el suelo, para producir

un volumen de escorrentía suficiente para iniciar un proceso de erosión y concentración en un canal de corriente definido. Su valor está influenciado por la intensidad de la escorrentía, la capacidad de infiltración, la resistividad del suelo a la erosión y la pendiente de la superficie (Horton, 1945).

La Tabla 61 categoriza los resultados de  $L_g$ , en donde valores mayores a 0,7 indican predominancia de erosión laminar y valores menores a 0,4 indican predominancia en la erosión del cauce (Horton, 1945).

Tabla 61: Características de la cuenca de acuerdo con el valor  $L_g$

<b><math>L_g</math></b>	<b>Descripción</b>
< 0,4	Más erosión del Cauce
0,4 - 0,5	Erosión del cauce
0,5 - 0,6	Valor medio
0,6 - 0,7	Erosión laminar
> 0,7	Más erosión laminar

#### 10.3.1.4. Parámetros relacionados al relieve de la cuenca

Los parámetros del relieve permiten entender la respuesta hidrológica de la cuenca, ya que influyen directamente en el tiempo de concentración, capacidad de almacenamiento hídrico, intensidad de procesos erosivos y velocidad de evacuación, por medio de la descripción de las pendientes y su relación con factores estructurales, dando lugar a interpretaciones más certeras sobre la amenaza a la que se ve sometida toda la cuenca (Melton, 1957).

**Relieve o desnivel altitudinal (H).** Se obtiene de la diferencia entre la cota de mayor altitud y la de menor altitud. Suele ser relacionado con la variabilidad climática, ya que hace referencia a la cantidad de pisos altitudinales que se asocian a las variaciones en precipitación y temperatura en toda la cuenca (Ibáñez, Moreno, y Gisbert, 2010).

**Pendiente media de la cuenca (S).** Es calculada a partir de las pendientes presentes en toda la cuenca, tomando en cuenta la constante de la línea de máxima pendiente. Este parámetro representa la velocidad de escorrentía, capacidad de transportar sedimentos y poder erosivo.

**Relación del relieve (Rh).** Se define como la relación de relieve horizontal a lo largo de la longitud máxima de la cuenca paralela al cauce principal. Este parámetro mide la inclinación general de la cuenca y representa la intensidad de los procesos erosivos presentes en esta. La relación de relieve es menor cuando

se tiene una cuenca de gran área, siendo los valores más altos característicos de zonas montañosas y los más bajos asociados a zonas de bajas pendientes (Schumm, 1956).

**Número de robustez (Rn).** Permite identificar la complejidad estructural del terreno, en donde los valores más altos hacen referencia a altos relieves asociados a largas y empinadas pendientes, además de elevadas densidades de drenaje (Strahler, 1957). Se consideran valores altos, los asociados a regiones montañosas con altas precipitaciones, estos son importantes en climas tropicales (Schumm, 1956). La Tabla 62 representa los atributos dados para el número de robustez.

Tabla 62: Distribución del numero de robustez.

Numero de robustez	Atributo
< 0,18	bajo
0,18 - 0,36	moderadamente bajo
0,36 - 0,54	moderado
0,54 - 0,79	moderadamente alto
> 0,79	alto

**Índice de Melton (M).** El índice de Melton es un índice de la robustez normalizado de la energía gravitacional, considerado como uno de los parámetros de mayor importancia para definir la torrencialidad de una cuenca. Mediante su análisis, es posible identificar la susceptibilidad de la cuenca a presentar flujos de escombros, ya que incluye la influencia de la geomorfología como el grado de resistencia del relieve a presentar dichos flujos. De igual forma, diferencia las cuencas con potencial torrencial de las cuencas con transporte de sedimentos por inundación (Melton, 1957).

Este parámetro es la relación entre el relieve o diferencia de altitud de la cuenca y la raíz del area de la cuenca. A partir de su clasificación, una cuenca presenta torrencialidad cuando el índice de Melton presenta valores superiores a 0,35 (Corpoamazonía, 2018). La Tabla 63 permite identificar el proceso hidrogeomorfológico asociado al indice de Melton.

Tabla 63: Límites de clases para procesos hidrogeomorfológicos relacionados con el índice de Melton (Wilford y cols., 2004).

Proceso hidrogeomorfológico	Límite de clase para índice de Melton
Inundación	< 0,30
Inundación de escombros	0,30 - 0,6
Flujo de escombros	> 0,6

**Curva hipsométrica.** Esta curva representa o bien el porcentaje de área o la superficie de una cuenca en km<sup>2</sup> que existe por encima de una cota determinada (Ordóñez, 2011) . Se obtiene colocando en las ordenadas los valores correspondientes a las diferentes alturas de la cuenca referidos a la máxima de la misma y, en las abscisas, los valores de área que se encuentran por encima de las alturas correspondientes, referidos al área total de la cuenca (Strahler, 1957). Las curvas hipsométricas también han sido relacionadas con las edades del cauce principal de las cuencas, indicando el grado de juventud o vejez de este (Figura 129).

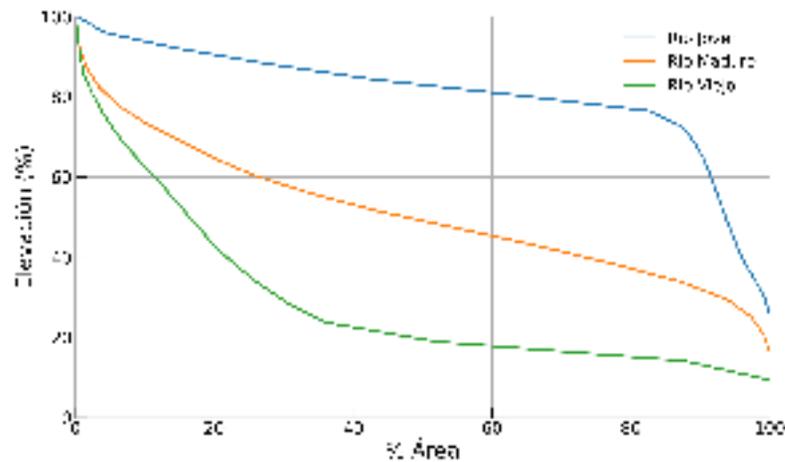


Figura 129: Cambio de forma de la curva hipsométrica con la edad del río. Fuente: Elaboración propia

**Histograma de frecuencias altimétricas.** Es utilizado para describir la sucesión de altitudes y la frecuencia de los diferentes niveles altitudinales. Su proceso es el mismo que el de las curvas hipsométricas, expresados en valores absolutos o relativos asignados a cada nivel de elevación. Se representa en porcentajes tomando en cuenta el promedio de las alturas, por lo que se diferencia de la curva hipsométrica al demostrar de manera probabilística la variación en las altitudes de la cuenca (Clarke, 1997).

**Perfil longitudinal.** El perfil longitudinal de un río, se define como la línea continua que representa las alturas presentes a lo largo de todo el cauce, hasta el nivel base en el punto de desembocadura. La presencia de curvaturas convexas o aplanadas y de cambios repentinos, evidencian afloramientos de rocas duras o actividad tectónica reciente. Por medio del perfil longitudinal es posible identificar particularidades del relieve de la cuenca, expuestas por procesos erosivos, que permiten observar deformaciones de la corteza, variaciones eustáticas, cambios en el clima o procesos fluviales (Whipple, 2004), proporcionando información muy relevante para la descripción de patrones espaciales y temporales, ocasionados por evolución tectónica, geomorfológica y climática (Duvall, Kirby, y Burbank, 2004).

Tabla 64: Parámetros morfométricos de la cuenca utilizados para la evaluación de torrencialidad

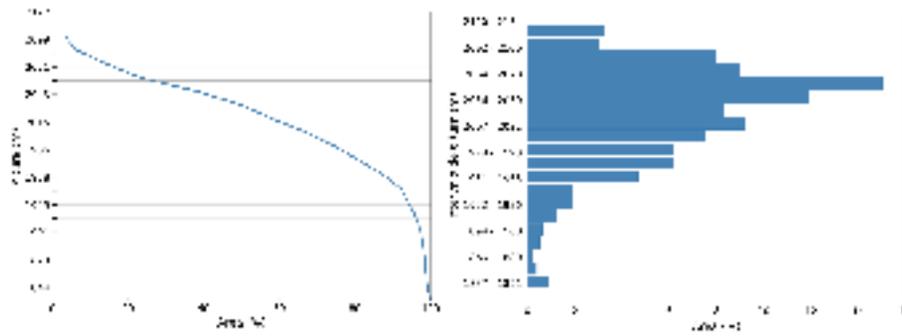
	N°	Parámetros	Fórmula	Referencia
Red de Drenajes	1	Orden cauce principal (Su)	Rango jerárquico	Strahler (1957)
	2	Número de drenajes (Nu)	$Nu = N_1 + N_2 + \dots + N_n$	Horton (1945)
	3	Longitud de los drenajes (Lu)	Longitud de los drenajes	Horton (1945)
	4	Long. cauce principal (C1)	$C1 = Lu / Nu$	Horton (1945)
	5	Relación de longitud de los drenajes (Lur)(Rl)	$Lur = Lu / Lu + 1$	Strahler (1957)
	6	Relación de bifurcación (Rb)	$Rb = N_u / N_{u+1}$	Horton (1945)
	7	Coefficiente $\rho$ ( $\rho$ )	$\rho = Lur / Rb$	Horton (1945)
Geometría y forma de Cuenca	8	Longitud de la cuenca (Lb)	Longitud en km	
	9	Área (A)	Área en km <sup>2</sup>	
	10	Perímetro (P)	Perímetro en km	
	11	Factor forma (Ff)	$Ff = A / Lb^2$	Horton (1945)
	12	Relación de elongación (Re)	$Re = 2 / Lb * (A / \pi)^{0,5}$	Strahler (1957)
	13	Relación de circularidad (Rc)	$Rc = 4\pi A / P^2$	Miller (1953)
	14	Coefficiente compacidad (Cc)	$Cc = 0,2841 * P / A^2$	Bendjoudi y Hubert (2002)
	15	Relación de textura (Rt)	$Rt = N1 / P$	Schumm (1956)
	16	Relación de aptitud (Rf)	$Rf = C1 / P$	Melton (1957)
	17	<i>Wandering Ratio</i> (Rw)	$Rw = C1 / Lb$	Smart y Surkan (1967)
Textura drenaje	18	Frecuencia de drenaje (Fs)	$Fs = Nu / A$	Horton (1945)
	19	Densidad de drenaje (Dd)	$Dd = Lu / A$	Horton (1945)
	20	Constante de mantenimiento de canal (C)	$C = 1 / Dd$	Schumm (1956)
	21	Intensidad de drenaje (Di)	$Di = Fs / Dd$	Faniran (1968)
	22	Número de infiltración (If)	$If = Dd * Fs$	Zavoianu (2011)
	23	Coefficiente de torrencialidad (Ct)	$Ct = N1 / A$	Díaz & López (1987)
	24	Longitud del flujo superficial (Lg)	$Lg = A / (2 * Lu)$	Horton (1945)
	Características del Relieve	25	Relieve (H)	$H = Z - z$ ; Z: Cota mayor, z: Cota menor
26		Pendiente media de la cuenca (S°)	Pendiente de la cuenca	
27		Relación de relieve (Rh)	$Rh = H / Lb$	Schumm (1956)
28		Número de robustez (Rn)	$Rn = Dd * H$	Schumm (1956)
29		Indice de Melton (M)	$M = H / (A)^{0,5}$	Melton (1957)

A continuación en la Tabla 65, se presentarán los resultados de los índices morfométricos obtenidos, correspondientes a las cuencas del antiguo ETCR Los Monos.

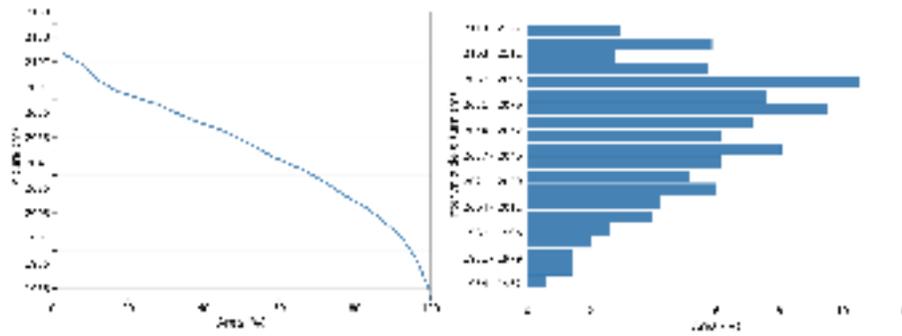
Las Figuras 130 y 131 presentan los gráficos de los resultados obtenidos para la curva hipsométrica e histograma altimétrico, y perfil longitudinal respectivamente.

Tabla 65: Índices morfométricos para la evaluación de la torrencialidad de las Cuencas Nn, Nn1, Nn2 y Qda. Gusano del antiguo ETCR Los Monos

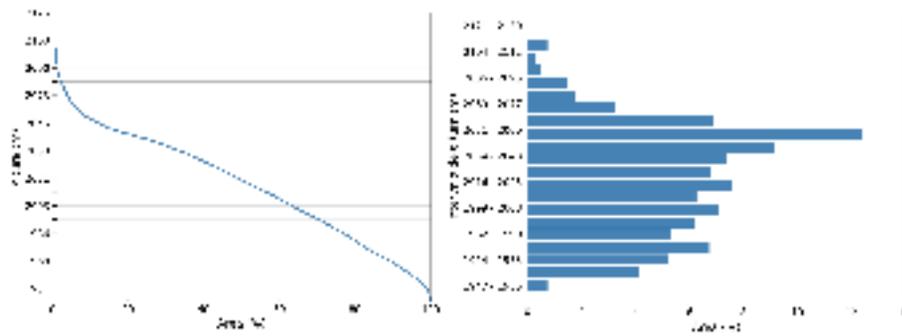
	Parámetro	Símbolo	Cuenca Nn	Cuenca Nn1	Cuenca Nn2	Cuenca Qda. Gusano
Red de Drenaje	Orden de la cuenca	Su	4	3	3	3
	Longitud del cauce principal (km)	C1	1,852	1,047	1,449	1,357
	Número total de corrientes	Nu	69	19	34	34
	Longitud total de las corrientes (km)	Lu	11,848	2,261	1,168	7,177
	Relación de bifurcación	Rb	3,535	1,625	1,800	2,250
	Relación de longitud	Rl	2,105	1,316	1,038	1,864
	Coefficiente $\rho$	$\rho$	0,596	0,810	0,577	0,828
Geometría y forma de la cuenca	Longitud de la cuenca (km)	Lb	1,558	1,159	1,48	1,801
	Área (km <sup>2</sup> )	A	1,757	0,685	1,221	1,462
	Perímetro (km)	P	7,951	4,75	6,15	6,85
	Factor forma	Ff	0,724	0,510	0,557	0,451
	Relación de elongación	Re	0,960	0,806	0,842	0,758
	Relación de circularidad	Rc	0,349	0,382	0,406	0,392
	Coefficiente de compacidad	Cc	1,704	1,630	1,581	1,609
	Relación de textura	Rt	4,779	2,105	2,927	2,628
	Relación de aptitud	Rf	0,233	0,220	0,236	0,198
<i>Wandering Ratio</i>	Rw	1,189	0,903	0,979	0,753	
Textura de las corrientes	Frecuencia de drenaje	Fs	39,271	27,737	27,846	23,256
	Densidad de drenaje	Dd	6,743	3,301	0,957	4,909
	Constante de mantenimiento del canal	C	0,148	0,303	1,045	0,204
	Intensidad de drenaje	Di	5,824	8,403	29,110	4,737
	Número de infiltración	If	264,820	91,553	26,637	114,163
	Coefficiente de torrencialidad	Ct	21,628	14,599	14,742	12,312
	Longitud del flujo superficial (km)	Lg	0,074	0,151	0,523	0,102
Características del relieve	Relieve (km)	H	0,284	0,166	0,174	0,536
	Pendiente media de la cuenca (°)	S	16,040	15,410	14,545	18,951
	Relación del relieve	Rh	0,182	0,144	0,118	0,298
	Número de robustez	Rn	1,914	0,550	0,167	2,631
	Índice de Melton	M	0,214	0,201	0,158	0,443



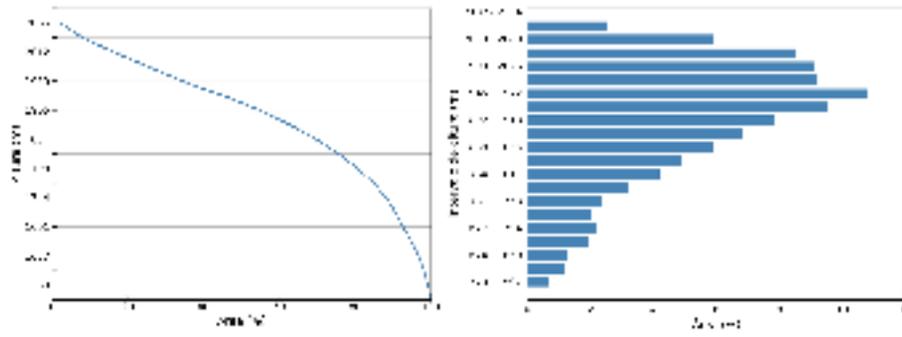
(a) Cuenca Nn



(b) Cuenca Nn1



(c) Cuenca Nn2



(d) Cuenca Qda. Gusano

Figura 130: Curvas hipsométricas e histograma de altitudes para las cuencas del antiguo ETCR Los Monos

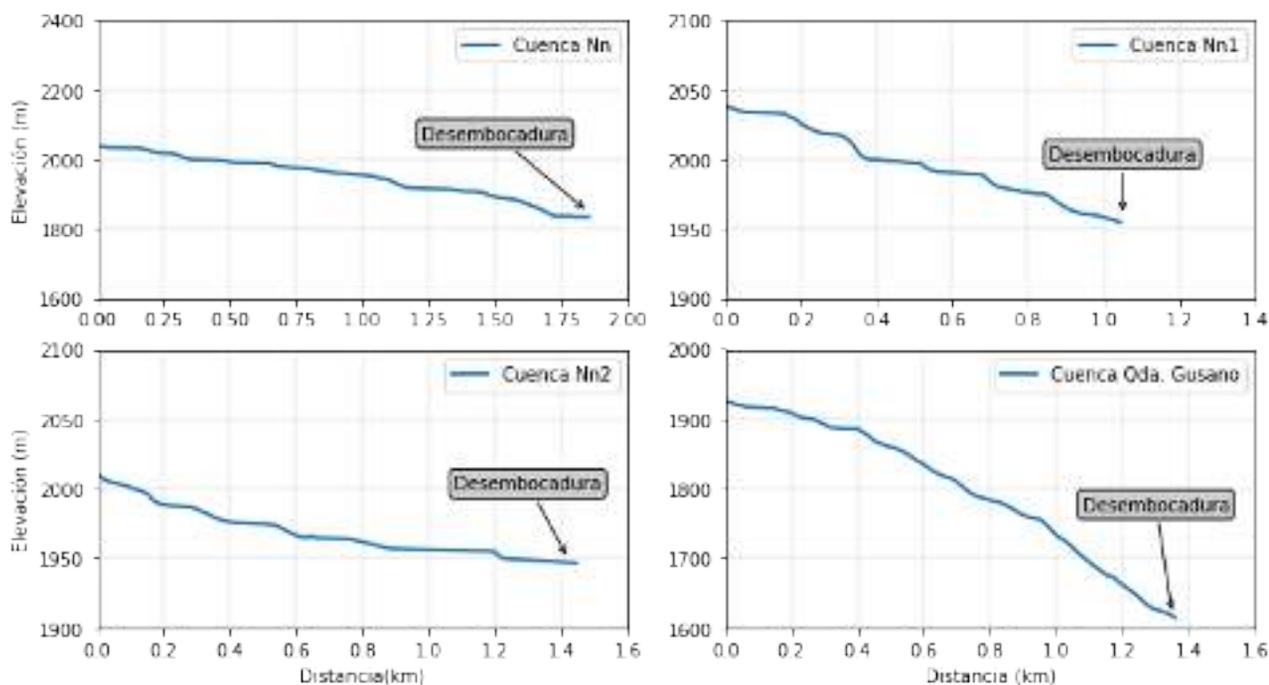


Figura 131: Perfil longitudinal de las cuencas Nn, Nn1, Nn2 y Qda. Gusano del antiguo ETCR Los Monos.

En el antiguo ETCR Los Monos se identificaron dos cuencas principalmente, las cuales son llamadas cuenca Nn y cuenca Qda. Gusano. La cuenca Qda. Gusano, se reconoce por que sus aguas corren de este a oeste, su forma es alargada con pendiente moderada, es la que presenta mayor relieve y su longitud es la más extensa entre las cuencas. Por otro lado la cuenca Nn, es la de mayor área y perímetro, Su forma es ensanchada y de fuerte pendiente. En el proceso de análisis de ambas cuencas, se identificó que la cuenca A ostentaba dos cauces importantes, con el fin de no discriminar a ninguno de los dos, se tomó la decisión de dividir la cuenca Nn en dos partes, las cuales fueron nombradas cuenca Nn1 y cuenca Nn2, Sin embargo, No se ignoró a la cuenca Nn como cuerpo entero, es decir, se trabajó la cuenca Nn, Nn1 y Nn2, con el fin de tener un análisis completo y detallado de la posible susceptibilidad y amenaza que estas puedan presentar.

A continuación se realizará una interpretación de los resultados obtenidos de las cuencas en estudio, que se muestran en la Tabla 65.

Según la definición de Relación de bifurcación, la cuenca Nn corresponde a una cuenca de pendiente fuerte pues su valor se encuentra dentro del rango 3 y 5, mientras que la cuenca Nn1, Nn2 y Qda. Gusano por tener un valor tan cercano a 2, corresponden a cuencas con pendientes menos fuertes.

Al realizar un análisis de los resultados de Rb y Rl para cada cuenca, teniendo en cuenta sus rangos de valor, se interpreta que el coeficiente  $\rho$  para las cuencas Nn1 y Qda. Gusano tiende a ser alto, lo que significa mayor capacidad de almacenamiento hídrico, es decir, las cuencas son más propensas a sufrir una inundación y se atenuarán los efectos erosivos. Por el contrario, para las cuencas Nn y Nn2 el coeficiente  $\rho$  tiende a ser bajo, lo que significa que son más propensas a sufrir una avenida torrencial ya que su capacidad de almacenamiento hídrico es menor.

El factor de forma permite identificar si la cuenca es preferentemente alargada o ensanchada, en el caso de la cuenca Nn se registra una forma ensanchada, mientras que para las cuencas Nn1, Nn2 y Qda. Gusano su forma es ensanchada ligeramente. Lo anterior significa que la cuenca Nn es más propensa a una creciente que las otras cuencas, sin embargo, según la definición, en general una cuenca ensanchada va a ser más propensa a una creciente que una cuenca con forma alargada, es decir, las cuencas Nn1, Nn2 y Qda. Gusano también son propensas a una creciente. No obstante la relación de circularidad permite tener más claridad de la morfología de la cuenca. Los valores respectivos a este índice de las cuencas son muy semejantes entre sí y a su vez, son levemente más cercanos al valor 0 que al valor 1, lo que permite interpretar una morfología intermedia entre ensanchada y alargada. El coeficiente de compacidad también permite dar una aproximación a la forma de la cuenca, en este caso las 4 cuencas tienen un valor superior al 1,51 lo que indica que son clase *III*, es decir, que la forma de estas cuencas corresponde a oval-oblonga a rectangular-oblonga.

La relación de elongación permite conocer que tan pronunciado es el relieve de la cuenca, para el caso de la cuenca Nn el relieve es poco pronunciado debido a que su valor es muy cercano a 1; el valor de la cuenca Qda. Gusano se encuentra dentro del rango mencionado en la definición, por tal motivo esta cuenca es de relieve pronunciado; finalmente las cuencas Nn1 y Nn2 son de relieve poco pronunciado, sin embargo su valor está más cercano a 0,8 que a 1.

En las cuatro cuencas, el valor del índice frecuencia de drenaje, es considerado "Muy alto", es decir, una rápida evacuación de las aguas en la cuenca, lo que implica la reducción de amenaza por avenidas torrenciales en esta.

Para la cuenca Nn2 el bajo valor de la densidad de drenaje implica un terreno resistente a la erosión, suelos permeables y pendientes suaves. Por el contrario para las cuencas Nn, Nn1 y Qda. Gusano, su alto valor en la densidad de drenaje significa, mayor potencial de erosión, suelos impermeables, pendientes fuertes y

escasa cobertura vegetal. Lo anterior implica que la cuenca tendrá una respuesta más rápida frente a un evento torrencial.

La constante de mantenimiento del canal, trata de la permeabilidad de las rocas de la cuenca, un índice semejante al anterior. Para la cuenca Nn y Qda. Gusano los valores son menores a 0,3, esto refleja poca infiltración, baja permeabilidad, pobre cobertura vegetal y suelos débiles menos resistentes a la erosión. La cuenca Nn2 presenta un valor mayor a 0,5, lo cual refleja mayor infiltración, más alta permeabilidad, mejor cobertura vegetal y rocas más resistentes a la erosión. Para la cuenca Nn1 su valor está entre el rango donde se consideran las mismas características anteriores pero moderadas.

De las cuatro cuencas la que tiene mayor valor de coeficiente de torrencialidad es la cuenca Nn, lo que refleja alta susceptibilidad a la erosión, alta torrencialidad y menor tiempo de llegada, en comparación con las cuencas Nn1, Nn2, y Qda. Gusano. Los valores del flujo de longitud terrestre, indica que las cuencas Nn, Nn1 y Qda. Gusano presentan mayor erosión del cauce y la cuenca Nn2 presenta un valor medio entre erosión del cauce y erosión laminar.

El desnivel altitudinal es significativo para la cuenca Qda. Gusano ya que su valor es considerado alto, lo que refleja una posible variación en la precipitación y temperatura en toda la cuenca. Para las cuencas Nn y Qda. Gusano el valor del número de robustez está asociado a regiones montañosas con altas precipitaciones. La cuenca Nn1 por su valor se le da el atributo "moderadamente alto" la cuenca Nn2 recibe el atributo "bajo", lo que indica bajo relieve, pendientes poco empinadas y cortas, además de bajas densidades de drenaje.

A partir de el índice de Melton se observa que las cuencas Nn, Nn1 y Nn2, son más propensas a un evento de transporte de sedimento por inundación que a uno torrencial. Por el contrario la cuenca Qda. Gusano presenta torrencialidad e inundación de escombros.

La curva hipsométrica de la cuenca Nn1 y Qda. Gusano indican que el cauce principal corresponde a un río joven, lo que refleja un mayor potencial erosivo. Por el contrario la curva de la cuenca Nn2 describe un río viejo, que refleja equilibrio y estabilidad. Finalmente la cuenca Nn indica que el cauce principal corresponde a un río joven en transición a su madurez, en el que se puede ver como un estado moderado entre potencial erosivo y estabilidad.

El histograma de frecuencias altimétricas refleja que la mayoría de las alturas de la cuenca Nn presentan un rango entre los 2000 y 2100 msnm (metros sobre el nivel del mar). Las alturas de la cuenca Qda. Gusano se concentran entre los

1870 y 2050 msnm. La cuenca Nn1 se concentra al rededor de la cota 2070. En la cuenca Nn2 priman las cotas desde 1960 hasta 2060 msnm.

El perfil longitudinal de la cuenca Nn1 es el que se muestra más irregular ya que se observan cambios repentinos, esto evidencia afloramiento de rocas duras o actividad tectónica reciente. La cuenca Qda. Gusano, es la que se muestra con mayor pendiente y algunos cambios repentinos en la curva. Por otro lado la cuenca Nn2 muestra zonas planas, cambios repentinos y abruptos en la curva. La cuenca Nn es la que menos irregularidades presenta en la curva, además muestra una pendiente moderadamente fuerte.

En conclusión las cuatro cuencas del antiguo ETCR Los Monos, pueden representar una amenaza para los cultivos y fincas aledañas, siempre y cuando hallan varios eventos interactuando, como por ejemplo lluvias fuertes y constantes.

Arango, Aristizábal, y Gómez (2020) encontraron por medio de varios métodos de selección estadística, para evaluar la relación entre parámetros morfométricos y la susceptibilidad a eventos torrenciales, basados en el aprendizaje automático; que los parámetros más asociados a la torrencialidad, corresponden a los relacionados con el relieve de la cuenca y la textura del drenaje, siendo la relación de relieve y la constante de mantenimiento de canal, los parámetros con mayor capacidad de predicción para las cuencas de los Andes colombianos. En general para los parámetros de la red de drenaje, en las cuencas torrenciales se presentan valores bajos para los parámetros de número de drenajes, longitud de los drenajes y la relación de longitud de los drenajes. Al igual que una relación de bifurcación y coeficiente  $\rho$  inferior a las cuencas que no se consideran susceptibles a presentar este tipo de eventos., demostrando cuencas poco incisadas y con menor capacidad de almacenamiento de canales por unidad de área. Los parámetros asociados a la geometría y forma de la cuenca se resumen en el alargamiento de estas, el cual se relaciona directamente con la susceptibilidad torrencial. Mientras que las cuencas torrenciales presentan parámetros de textura como la densidad de drenaje, frecuencia de drenaje e intensidad de drenaje generalmente bajos y valores más altos de longitud de drenaje superficial y constante de mantenimiento de canal, indicando cuencas pobremente configuradas con lenta respuesta hidrológica, lo cual representa una esorrentía permanente, aumentando las tasas de erosión y provocando una alta producción de sedimentos a lo largo de las cuencas de ladera, como un componente fundamental de los flujos torrenciales. Los parámetros relacionados con el relie-

ve determinan la inclinación general de la cuenca y, en consecuencia la energía hidráulica; pero al mismo tiempo indican la intensidad de la erosión, es por esto que son tan importantes, resaltando la relación de relieve, el índice de Melton y el desnivel altitudinal, como los parámetros que mejor representan la energía gravitacional y dominancia de la susceptibilidad torrencial en la cuenca.

Wilford y cols. (2004) utilizó variables morfométricas para la interpretación de la dinámica de las cuencas, integrando un gran conjunto de parámetros para evaluar las inundaciones repentinas y el flujo de escombros en cuencas hidrográficas, principalmente para zonas áridas y de altas latitudes. Sin embargo, estos análisis han sido implementados como base para estudios de susceptibilidad torrencial en diferentes regiones al rededor del mundo. En áreas tropicales se han realizado pocos estudios que presenten análisis exhaustivos de susceptibilidad a escala de cuenca. Los umbrales sugeridos por Wilford y cols. (2004) utilizan el índice de Melton como un índice de pendiente ampliamente utilizado para distinguir cuencas propensas a presentar flujos de escombros e inundaciones de escombros, y la longitud de la cuenca como una representación general de la geometría. Para el presente trabajo se implementaron estos umbrales como una representación inicial de la susceptibilidad a eventos torrenciales, teniendo en cuenta que según Arango y cols. (2020) a pesar de que el índice de Melton es un buen predictor para cuencas torrenciales, en áreas hidrográficas de los Andes colombianos no es posible utilizarse directamente como un umbral, debido a la amplia variabilidad de este índice en las cuencas de las zonas montañosas tropicales.

La Figura 132 contiene los resultados obtenidos según los umbrales de Wilford y cols. (2004) para las cuencas del antiguo ETCR Los Monos. A continuación se describen los datos utilizados para dichos umbrales y los resultados obtenidos:

- Tanto para las cuencas Nn como para Gusano, se tienen Lb muy bajas que varían de 1,2 a 1,8 km.
- Para el índice de Melton, las cuencas Nn presentan valores muy bajos entre 0,16 y 0,2, lo cual las ubica en la zona de inundación.
- El índice de Melton en la cuenca Gusano sobresale respecto a las Nn, con un valor de 0,45, evidenciando una mayor influencia y capacidad de transporte de sedimentos.

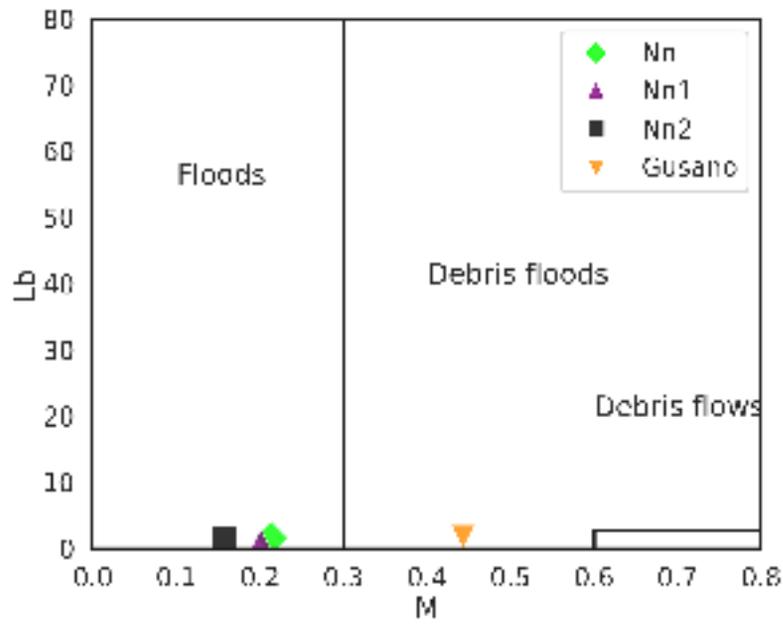


Figura 132: Umbrales de Wilford y cols. (2004) aplicados para el antiguo ETCR Los Monos.

- En general, según los umbrales de Wilford y cols. (2004), únicamente la cuenca Gusano podría presentar alguna susceptibilidad torrencial, sin embargo no es posible definir con exactitud una zona preferencial que represente la capacidad y la velocidad del transporte de los sedimentos, para así diferenciar el tipo de evento al que se encuentra más relacionada.

Arango y cols. (2020) resaltan la importancia de la relación de relieve como el parámetro con mayor capacidad de predicción para torrencialidad y utilizan la combinación de este parámetro con las variables de área, orden de Strahler e índice de Melton, para la construcción de gráficos que permitan entender la susceptibilidad torrencial de las cuencas. Para estas graficas se utilizaron las cuencas analizadas en dicho estudio, con el fin de permitir agrupaciones entre cuencas torrenciales y no torrenciales, y posteriormente concluir su relación con los resultados obtenidos para las cuencas del antiguo ETCR. La Figura 133 representa las combinaciones de variables analizadas para la evaluación de la torrencialidad. A continuación se describen los datos analizados y los resultados obtenidos:

- Para las cuencas Nn se obtienen valores Rh intermedios que van desde 0,11 hasta 0,18, ubicando únicamente a la cuenca Nn principal en zona torrencial. Mientras que Gusano sobresale con un Rh de 0,3.

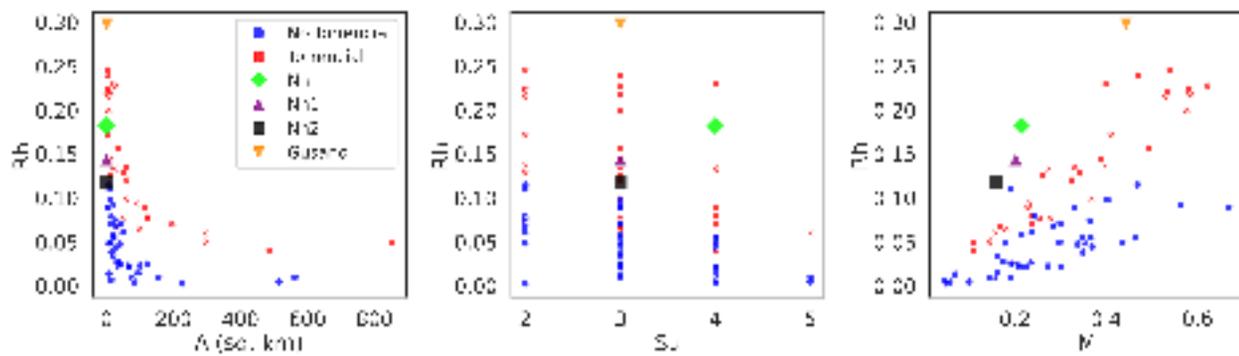


Figura 133: Comparación de variables con Rh para el antiguo ETCR Los Monos.

- Al analizar el orden Strahler se observa que Nn1 y Nn2 se agrupan junto a las cuencas no torrenciales, pero al ser analizadas de manera conjunta por medio del Nn principal, al aumentar el Rh, esta se ubica entre las cuencas susceptibles a presentar eventos torrenciales.
- A pesar de tener un índice de Melton bajo, los valores de Rh ubican a las cuencas Nn en zona torrencial pero, teniendo en cuenta los resultados obtenidos para las cuencas que comparan el orden y el área, no es posible considerar a Nn como totalmente susceptible.
- Para la cuenca Gusano se tienen valores muy altos de Rh en comparación con las Nn y con los grupos torrenciales y no torrenciales, esto se ve también muy claro al ser graficado el índice de Melton, apoyando la idea de una alta susceptibilidad a presentar eventos torrenciales.

En general para las cuencas Nn no se obtiene una diferencia notoria que permita concluir el tipo de evento asociado, sin embargo los resultados alejan dichas cuencas de ser consideradas totalmente no torrenciales, otorgando un valor torrencial si se presentan fuertes y extensas precipitaciones. Mientras que para la cuenca Gusano si se demuestran características bastante torrenciales.

### 10.3.2. Aporte de sedimentos

Para evaluar el potencial aporte de sedimentos, se implementó el modelo con base física SHALSTAB expuesto en la sección de amenaza por movimientos en masa (2.5), el cual modela la ocurrencia de movimientos en masa detonados por lluvia, escenario en el cual se puede presentar una avenida torrencial.

Con fines a estimar una potencial avenida torrencial alimentada enjambres

de movimientos en masa, se estima el volumen de sedimentos potencial a fallar en los diferentes periodos de retorno para las lluvias dadas en la Tabla 48. Este volumen se calcula para la subcuenca de la quebrada Gusano y de la cuenca Nn presentadas en las Figuras 134 a 136.

En las Figuras 134, 135 y 136 se presentan la amenaza por movimientos en masa superficiales según las condiciones de estabilidad para cada escenario de lluvia.

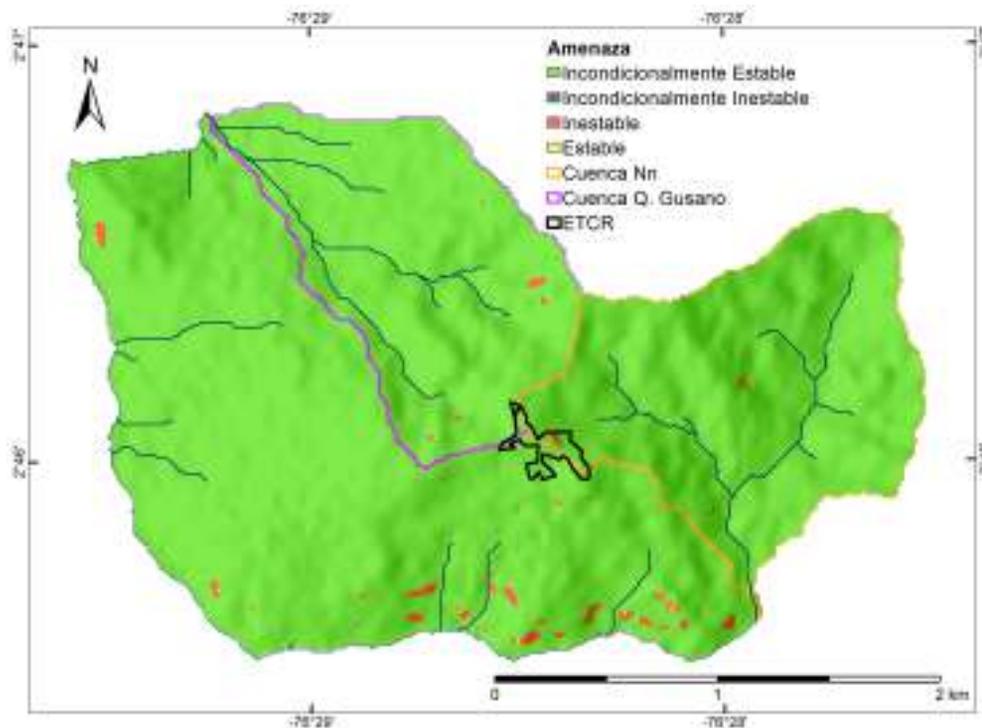


Figura 134: Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 10 años.

A partir de los resultados para las distintas intensidades de lluvia se observa que las condiciones de inestabilidad se concentran en las zonas de mayor inclinación de las laderas ubicadas en el costado Sur de la cuenca, en el cual se han identificado algunos movimientos en masa inactivos Figura 78. Las zonas inestables e incondicionalmente inestables son las consideradas para estimar el volumen potencial de material susceptible a ser removido, alcanzar el drenaje principal y ser arrastrado en caso de la ocurrencia de una avenida torrencial.

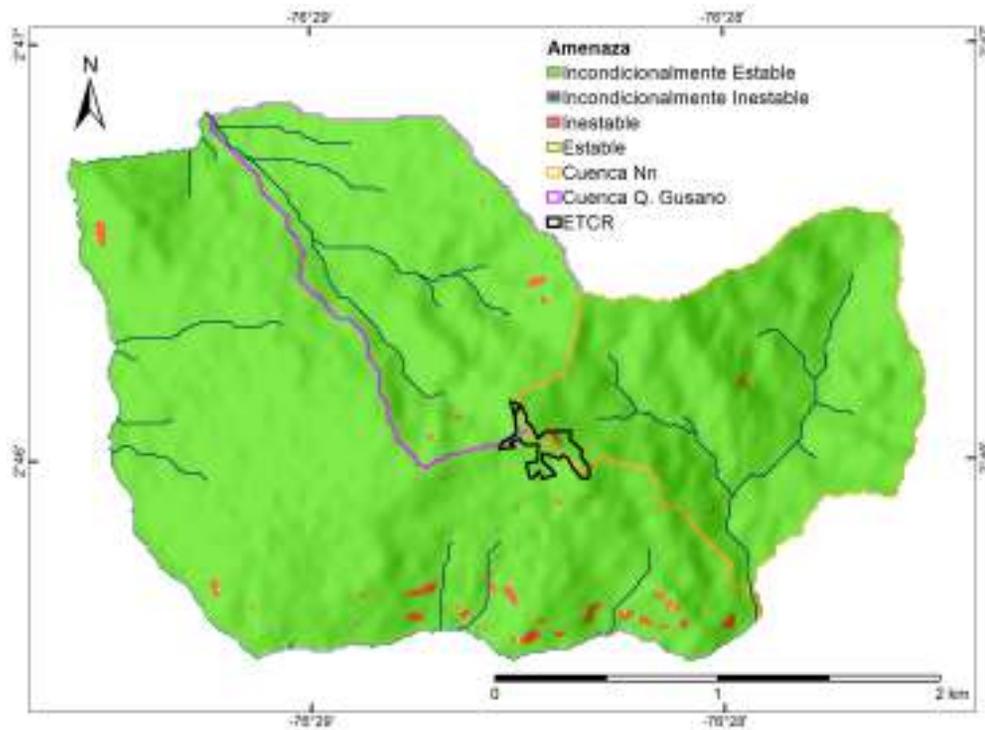


Figura 135: Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 100 años.

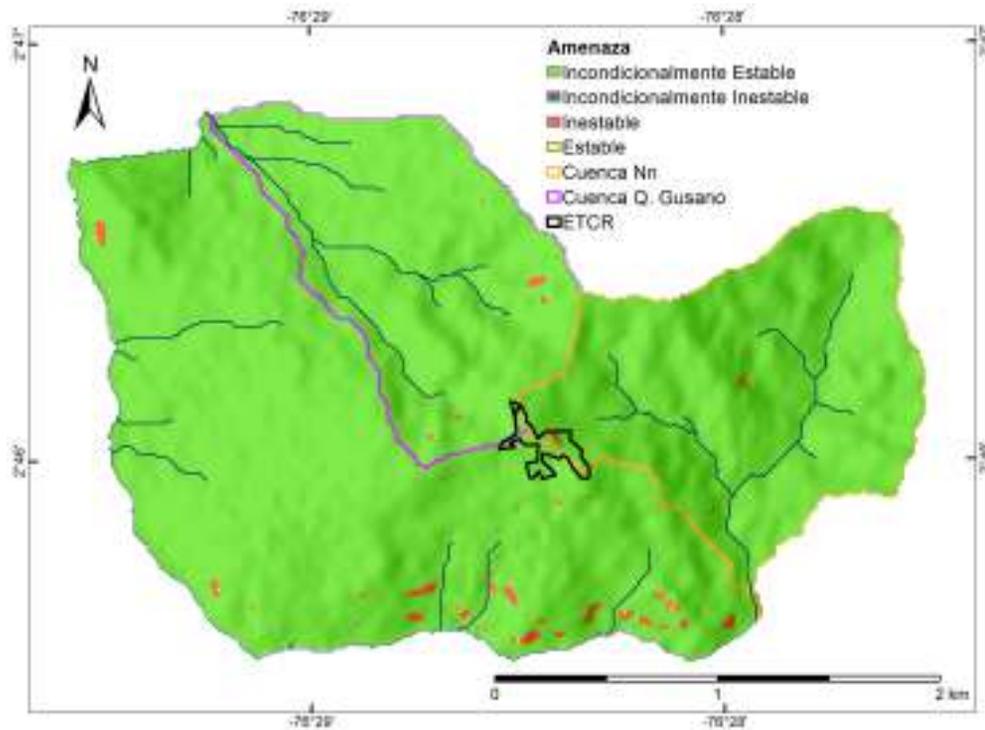


Figura 136: Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 500 años.

#### 10.4. Zonificación de manchas de avenidas torrenciales a escala de cuenca

El término avenida torrencial se refiere a la llegada de un caudal desde aguas arriba. Las avenidas se distinguen de las crecidas ya que en estas últimas el aumento del caudal se da en dirección vertical, desde los pies del espectador hacia su cabeza, mientras que la avenida llega desde aguas arriba hasta la posición de este, y en que el aumento de caudal de una avenida se presenta de forma súbita e impetuosa (Borga y cols., 2014; Díez Herrero, 2008). Por lo que es necesario, cuando se tienen cuencas hidrográficas con las características de alta pendiente, corto tiempo de respuesta ante fuertes lluvias y alto suministro de sedimentos y detritos, tener en cuenta el caudal de sedimentos Takahashi (2007).

Se realiza el procedimiento de estimación de manchas de avenidas torrenciales siguiendo la metodología descrita con el descriptor morfométrico *HAND* y la curva de calibración. La estimación de sólidos totales se realiza a partir de los resultados obtenidos previamente. A continuación, en la Tabla 66 y en la Tabla 67 se presentan los volúmenes de material sólido y líquido asociados a cada período de retorno para la Cuenca NN y para la quebrada Gusano respectivamente.

Tabla 66: Cálculo de caudal total para avenidas torrenciales Cuenca NN

Cuenca NN			
Tr (años)	10	100	500
Volumen sólido (m <sup>3</sup> )	3803,3	3803,3	5077,2
Caudal líquido (m <sup>3</sup> /s)	24,8	38,5	48,7
Tc (min)	36		
Volumen Líquido (m <sup>3</sup> )	53568,0	83160,0	105290,1
Volumen Total (m <sup>3</sup> )	57371,3	86963,3	110367,3
% Líquido	93,4	95,6	95,4
% Sólido	6,6	4,4	4,6
Caudal total (m <sup>3</sup> /s)	26,6	40,3	51,1

La zonificación de amenaza por avenida torrencial se define a partir de los períodos de retorno de 10 años (amenaza alta), 100 años (amenaza media) y 500 años (amenaza baja). Los resultados de la zonificación por avenida torrencial se presenta a continuación en la Figura 137 para el área de estudio del antiguo ETCR. Si bien en los resultados se obtienen los tres niveles de amenaza como se mencionó anteriormente, la diferencia entre estos es mínima y por efectos de la

Tabla 67: Cálculo de caudal total para avenidas torrenciales Qda. Gusano

Qda. Gusano			
Tr (años)	10	100	500
Vol sólido (m <sup>3</sup> )	7638,6	10163,1	11861,9
Caudal líquido (m <sup>3</sup> /s)	24,3	41,5	54,7
Tc (min)	20		
Volumen Líquido (m <sup>3</sup> )	29160,0	49800,0	65612,1
Volumen Total (m <sup>3</sup> )	36798,6	59963,1	77473,9
% Líquido	79,2	83,1	84,7
% Sólido	20,8	16,9	15,3
Caudal total (m <sup>3</sup> /s)	30,7	50,0	64,6

escala se procede a presentar la mancha ante avenidas torrenciales en amenaza alta.

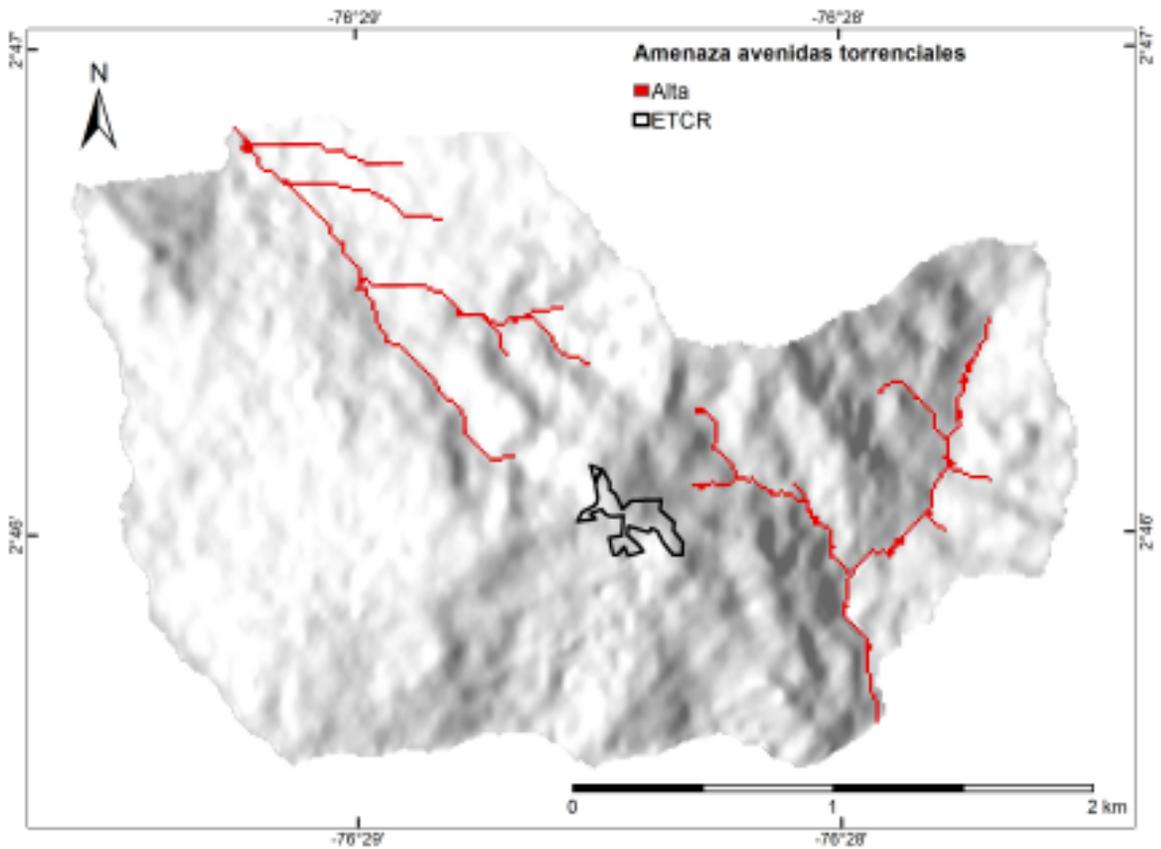


Figura 137: Zonificación de amenaza estudio básico para avenidas torrenciales

# Referencias

- Arango, M., Aristizábal, E., y Gómez, F. (2020). *Morphometrical analysis of torrential flows-prone catchments in tropical and mountainous terrain of the Colombian Andes by machine learning techniques*.
- Aristizábal, E., Carmona, M. I. A., y López, I. K. G. (2020). Definition and classification of torrential avenues and their impact in the Colombian Andes. *Cuad. Geogr. Rev. Colomb. Geogr.*, 29(1), 242–258. doi: 10.15446/rcdg.v29n1.72612
- Bendjoudi, H., y Hubert, P. (2002). Le coefficient de compacité de Gravelius: Analyse critique d'un indice de forme des bassins versants. *Hydrological Sciences Journal*, 47(6), 921–930. doi: 10.1080/02626660209493000
- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., y Jakob, M. (2014). Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology*, 518, 194–205.
- Busnelli, J., y Horta, L. (2014). Morfometría de cuencas montañas y metamorfosis fluvial (Tucumán-Argentina). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 71(1).
- Clarke, J. I. (1997). Altimetric frequency curve altimetric frequency curve. En *Geomorphology* (pp. 11–14). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Descargado de [https://doi.org/10.1007/3-540-31060-6\\_8](https://doi.org/10.1007/3-540-31060-6_8) doi: 10.1007/3-540-31060-6\_8
- Corpoamazonía. (2018). Actualización POMCA del río Hacha: Informe final fase de diagnóstico. , 250.
- Díaz & López. (1987). MORFOMETRIA DE REDES FLUVIALES: REVISION CRITICA DE LOS PARAMETROS MAS UTILIZADOS Y APLICACION AL ALTO GUADALQUIVIR. *Notes and Queries*, s3-V(126), 47–62. doi: 10.1093/nq/s3-V.126.435-a
- Díez Herrero, A. (2008). Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración. *Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España*, 1, 190.
- Duvall, A., Kirby, E., y Burbank, D. (2004). Tectonic and lithologic controls on bedrock channel profiles and processes in coastal California. *Journal of Geophysical Research*, 109(F3), 1–18. doi: 10.1029/2003jf000086
- Faniran, A. (1968). The index of drainage intensity—a provisional new drainage factor. *Australian journal of science*, 31, 328–330.
- Ferrando, F. J. (2015). Métodos hidromorfométricos para de terminar la erosividad en cuencas hidrográficas. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(3), 5–14.
- Gil, V. (2009). *Hidrogeomorfología de la cuenca alta del río Sauce Grande aplicada al análisis de crecida*.
- Horton, R. E. (1945). Erosion development in stream and their drainage basins. *Geological Society Of America Bulletin*, 56(1), 275–370. doi: 10.1130/0016-7606(1945)56
- Huanca, A. C. (1999). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río lucre. *Espacio y Desarrollo*(11), 125–145.
- Ibáñez, S., Moreno, H., y Gisbert, J. (2010). Morfología de las cuencas hidrográficas. *Universidad*

*Politécnica de Valencia*, 12.

- Mantilla, R., Mesa, O., y Poveda, G. (1998). Geometría, topología y morfometría de las cuencas magdalena-cauca y atrato a partir de modelos digitales de terreno. *XIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Cali*, 155–172.
- Melton, M. A. (1957). *An Analysis of the Relations Among Elements of Climate, Surface Properties, and Geomorphology*. (C. U. Department of Geology, Ed.).
- Miller, V. (1953). A quantitative geomorphologic study of drainage basin characteristics in the clinch mountain area. *Technical Report, 3*, 271–300.
- Ordóñez, J. (2011). ¿ Qué Es Cuenca Hidrológica ? *Sociedad Geológica de Lima, 1*, 1 – 44. Descargado de <http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm{ }Files/Publicaciones/Varios/Cuenca{ }hidrologica.pdf>
- Prabhakaran, A., y Jawahar Raj, N. (2018). Drainage morphometric analysis for assessing form and processes of the watersheds of Pachamalai hills and its adjoining, Central Tamil Nadu, India. *Applied Water Science, 8*(1), 1–19. Descargado de <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0646-5> doi: 10.1007/s13201-018-0646-5
- Sakthivel, R., Jawahar Raj, N., Sivasankar, V., Akhila, P., y Omine, K. (2019). Geo-spatial technique-based approach on drainage morphometric analysis at Kalrayan Hills, Tamil Nadu, India. *Applied Water Science, 9*(1), 1–18. Descargado de <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0899-7> doi: 10.1007/s13201-019-0899-7
- Schumm, S. A. (1956). EVOLUTION OF DRAINAGE SYSTEMS AND SLOPES IN BADLANDS AT PERTH AMBOY, NEW JERSEY. *BULLETIN OF THE GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA.*, 67(1), 56.
- Senciales González, J. M. (1999). *Redes fluviales: metodología de análisis* (Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico de la Universidad de Málaga, Ed.).
- SGC y UIS. (2014). *Susceptibilidad Y La Amenaza Relativa Por Plancha 343 – Silvia Susceptibilidad Y La Amenaza Relativa Por* (Inf. Téc. n.º 009). SGC.
- Smart, J. S., y Surkan, A. J. (1967). The relation between mainstream length and area in drainage basins. *Water Resources Research, 3*(4), 963–974. doi: 10.1029/WR003i004p00963
- Somashekar, R., Ravikumar, P., Sowmya, S., Dar, M. A., y Ravikumar, A. (2011). Runoff estimation and morphometric analysis for hesaraghatta watershed using irs-1d liss iii fcc satellite data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 39*(1), 95–106.
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *Transactions, American Geophysical Union, 38*(6), 913–920.
- Summerfield, P. M. (1991). *Global geomorphology* (1.ª ed.). Prentice Hall. Descargado de <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=b693dcd2a20f914ca7c4fa1e9eceed>
- Takahashi, T. (2007). Debris Flow. Mechanics, Prediction and Countermeasures. *Annual Review of Fluid Mechanics, 13*. doi: <http://doi.org/10.1146/annurev.fl.13.010181.000421>
- Whipple, K. X. (2004). Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 32*(1), 151-185. Descargado de <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.32.101802.120356> doi: 10.1146/annurev.earth.32.101802.120356
- Wilford, D. J., Sakals, M. E., Innes, J. L., Sidle, R. C., y Bergerud, W. A. (2004). Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides, 1*(1), 61–66. doi: 10.1007/s10346-003-0002-0
- Worschitz, R. O. (2014). TOPOGRAFÍA E HIDROGRAFÍA. En *Asignatura: Geomorfología* (pp. 1–17).
- Zavoianu, I. (2011). *Morphometry of drainage basins*. Elsevier.

## Capítulo 11

# Definición de áreas con condición de amenaza o riesgo

De acuerdo con el Decreto 1807 de 2014 el objetivo de zonificar la amenaza por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones, es identificar las áreas con condición de riesgo (ACR) y áreas con condición de amenaza (ACA) para su incorporación al Plan de Ordenamiento Territorial, y establecer los estudios de detalle necesarios y las obras de mitigación del riesgo requeridas.

En el presente estudio, con el fin de identificar las áreas que requieren una evaluación detallada de la amenaza, se definieron las ACA y ACR. Para este procedimiento se tomaron las zonas de amenaza media y alta por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales y se cruzó con el inventario de infraestructura del antiguo ETCR levantado con imágenes de satélite detalladas y en trabajo de campo.

A continuación se describe el procedimiento llevado a cabo para obtener cada uno de estos mapas.

### 11.1. Ocupación Territorial

Para precisar la información y dar una idea general de la ocupación del territorio se realizó un muestreo de las construcciones visibles, a partir de imágenes satelitales, con la ayuda proporcionada por *Arcgis Online* de *ESRI* a través de su plataforma *World Imagery*. Estos datos tienen un rango de actualidad de entre 3 y 5 años aproximadamente (última actualización: 22 de julio del 2020), permitiendo tener un conteo estimado de las casas que hacían parte de la zona de estudio. El proceso de selección se realizó por medio de los rasgos geométricos y colores característicos que señalan la intervención antrópica en el paisaje. Además, para la búsqueda de construcciones, se partió de los datos

ya suministrados por el algoritmo que se implementó para cuatro categorías de coberturas, denominado *Random Forest*, del cual se seleccionaron los pixeles correspondientes a la construcciones o urbanos y se corroboraron las zonas que según la interpretación visual correspondían a zonas con posibilidades de estar habitadas.

Según la Figura 138, para el antiguo ETCR Los Monos ,se obtuvieron un total de 359 posibles construcciones que se encuentran distribuidas por toda la zona de estudio.

A través del reconocimiento de la zona que se hizo en campo, se levantaron las construcciones presentes para el antiguo ETCR-Los Monos proporcionando un mejor acercamiento en lo que compete a la ocupación del territorio, ver Figura 139.

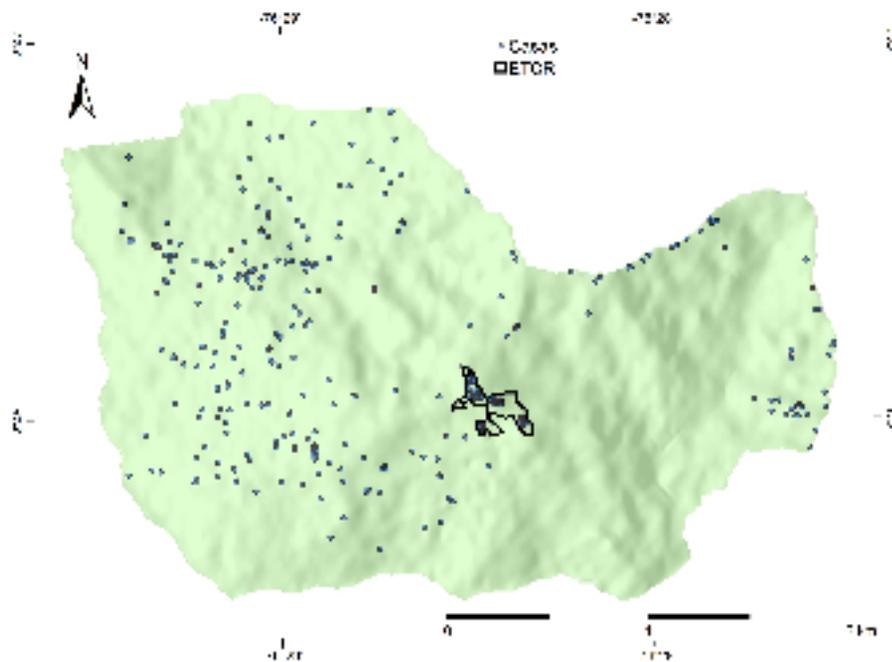


Figura 138: Ocupación territorial

### 11.1.1. Áreas con condición de amenaza (ACA)

El Decreto 1807 de 2014 establece que las zonas con condición de amenaza (ACA) corresponden a las zonas clasificadas como de amenaza media y alta en las que se establezcan en el POT la necesidad de clasificarlas como suelo urbano, de expansión o centros poblados rurales para permitir su desarrollo. en este caso los suelos corresponden a suelos rurales con miras a desarrollarse como centros poblados.

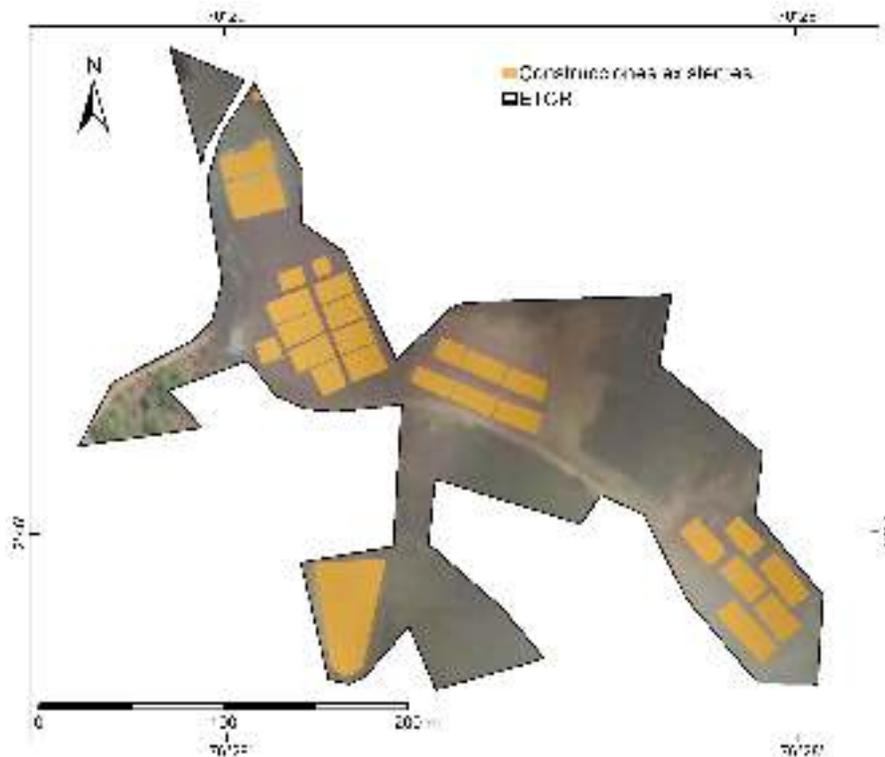


Figura 139: Levantamiento Construcciones

Para la delimitación de las ACA se utilizaron los mapas de amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales, al igual que la infraestructura que refleja la ocupación levantada en capo y las imágenes satélites actualizadas.

Con esta información se procede a evaluar la categoría media y alta en cada tipo de amenaza para ser contrastada con la infraestructura y así tener el mapa presentado en la Figura 140.

La única amenaza que se encuentra corresponde a movimientos en masa la cual se encuentra ampliamente distribuida en especial en el sur y al suroeste del antiguo ETCR.

### 11.1.2. Áreas con condición de riesgo (ACR)

áreas con condición de riesgo (ACR) son aquellas zonas clasificadas como de amenaza alta que estén urbanizadas, ocupadas o edificadas así como en las que se encuentren elementos del sistema vial, equipamientos e infraestructura de servicios públicos. También se indica dentro del parágrafo del Artículo 12 del Decreto 1807 de 2014, que las zonas de amenaza media para las cuales en la revisión o expedición de un nuevo POT se proponga el cambio de densidad

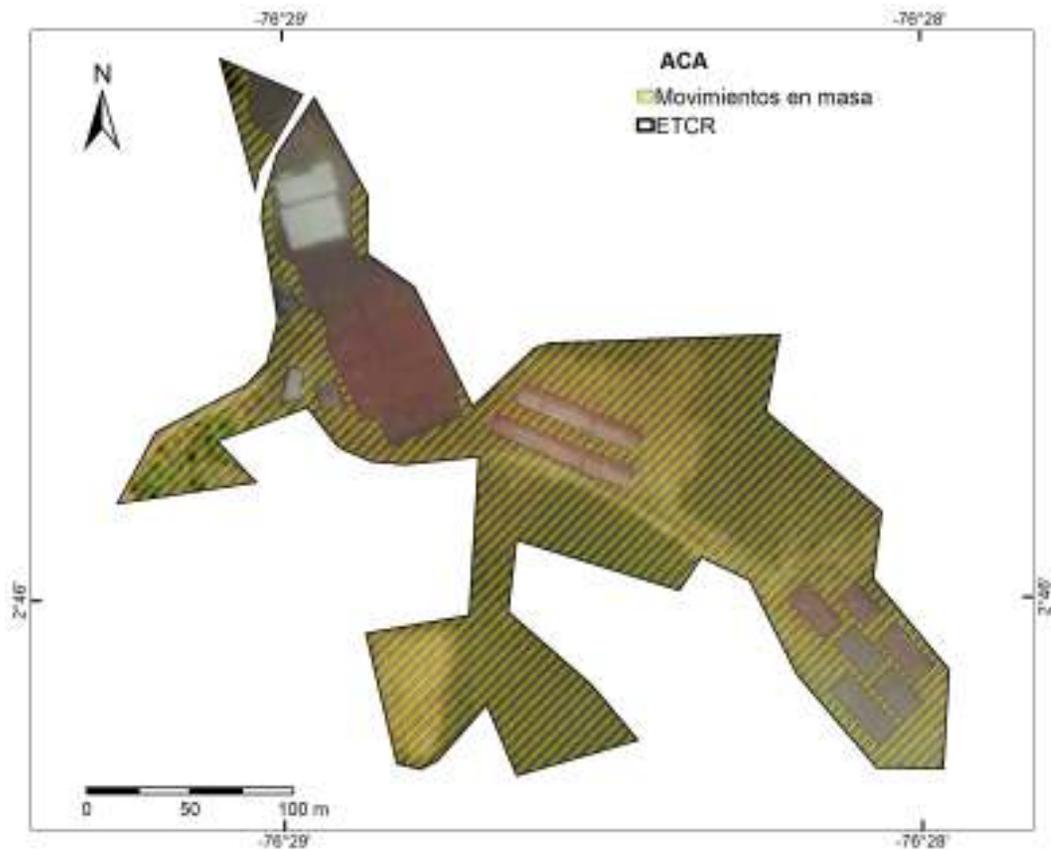


Figura 140: Zonas en condición de amenaza para el predio del antiguo ETCR.

o un cambio en los usos del suelo que pueda generar o incrementar el riesgo en la zona.

En la delimitación de las ACR se utilizaron los mapas de amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales, al igual que la infraestructura que refleja la ocupación levantada en capo y las imágenes satélites actualizadas.

Con esta información se procede a evaluar la categoría alta en cada tipo de amenaza para ser contrastada con la infraestructura y así tener el mapa que perita verificar la condición en el are, en el cual se resalta que la amenaza alta toque de manera parcial algún tipo de infraestructura se propende por el escenario mas critico, es decir, es marcada toda la edificación como riesgo y requerirá ser verificado en los estudios de detalle.

Debido a las bajas densidades de la ocupación de estos territorios, la infraestructura generalmente se encuentra por debajo del área mínima cartografiable ( $2.500 m^2$ ), ya que corresponden generalmente a viviendas aisladas. Sin embargo, como se mencionó anteriormente se incluyeron de forma conservadora estas

viviendas para su verificación en los estudios de detalle. Posterior a este proceso se resalta que para el antiguo ETCR Los Monos no se presenta ACR.

## 11.2. Medidas no estructurales

Finalmente, se presentan una serie de medidas generales que se pueden implementar en las zonas caracterizadas como amenaza alta en cada zona:

- Es recomendable la incorporación de estos estudios al ordenamiento territorial y de normas urbanísticas a que haya lugar por parte del ente municipal.
- Se debe definir medidas de manejo especial para las zonas de amenaza alta y mediante el desarrollo de usos agroforestales, la implementación de prácticas culturales de conservación, manejo de cultivos y manejo de escorrentías.
- Implementar planes de manejo de cauces en las quebradas aledañas y de abastecimiento del antiguo ETCR.
- Se recomienda asistencia técnica y mejoramiento de prácticas agrícolas en zonas de ladera y reforestación de las laderas de montaña.
- Vigilancia y control normativo por parte de las autoridades frente a acciones de tala y quemas.
- Capacitación a la comunidad en normativa ambiental y cuidado de los terrenos y el recurso hídrico
- Prácticas agrícolas que controlen la erosión y sedimentación
- Se recomienda la instalación de un sistema de alerta temprana en las corrientes susceptibles de generar este fenómeno amenazante.
- Se propone socializaciones y capacitaciones a la comunidad sobre la importancia de la gestión del riesgo, en especial el dar a conocer las zonas demarcadas con condición de amenaza y los respectivos retiro.

### 11.2.0.1. Recomendaciones específicas

1. En la zona identificada como punto para abastecimiento hídrico del antiguo ETCR debido a las intervenciones antrópicas realizadas sobre el cauce las cuales, sin un mantenimiento periódico pueden ser obstruidas fácilmente

por material (troncos, hojas, bloques de roca, etc.) dando como resultado obras con insuficiencia hidráulica reduciendo o anulando el abastecimiento, se debe garantizar un mantenimiento constante.

2. Si bien dentro del antiguo ETCR Los Monos no hay zonas definidas en amenaza por inundación, se recomienda tener presente esta zonificación para proyecciones territoriales aledañas.
3. Durante los periodos invernales se debe realizar un constante control del estado de las laderas que presentan procesos erosivos, especialmente el lleno antrópico ubicado en el antiguo ETCR y las zonas de pobre cobertura vegetal, para reducir la ocurrencia de movimientos en masa superficiales en estado saturado y evitar daños sobre la población e infraestructura.
4. Se recomienda realizar cobertura vegetal de baja altura tipo pastos en las laderas del lleno antrópico para evitar la erosión que a la fecha se viene presentando. Además, extender los descoles para evitar la erosión en la pata de la ladera.
5. Se recomienda un adecuado manejo del material detrítico usado para el mantenimiento de las vías cercanas al predio, ya que no se está teniendo en cuenta la orientación de la foliación de la roca extraída.

## Parte IV

# Viabilidad por Amenaza *Estudios de Detalle*

## Capítulo 12

# Amenaza por Movimientos en masa

### Introducción

El presente capítulo corresponde a los Estudios de Detalle por movimientos en masa a escala 1:2.000, bajo la recomendación del Decreto 1077 de 2015. Para lo cual se utilizaron metodologías con base físicas, específicamente los modelos TRIGRS y Scoops3D.

Por medio del modelo TRIGRS es posible analizar los deslizamientos superficiales con superficie de falla planar detonados por lluvias. El modelo tiene en cuenta la intensidad de la lluvia, el tiempo de duración, las condiciones de humedad inicial, las variaciones de la permeabilidad y la succión de suelo, así como los parámetros de resistencia. La resistencia del suelo disminuye a medida que aumenta la presión de poros con el aumento del contenido de agua en el suelo producto de la infiltración de la lluvia. De esta manera, es posible estimar la profundidad en la cual se dan las probables superficies de falla calculando de forma determinista el factor de seguridad para cada celda. Para este estudio en particular, el modelo TRIGRS fue combinado con una aproximación probabilística basada en el método FOSM, el cual permite tener la variabilidad de los parámetros y su influencia en el factor de seguridad, presentando el resultado en términos del índice de confiabilidad y su relación con la probabilidad de falla.

El modelo Scoops3D se utilizó con el propósito de estimar los deslizamientos con superficie de falla circular profunda. Este modelo permite incluir en el análisis 3 espesores de material (e.g. suelo residual, saprolito y roca) y analizar la posibilidad de que se presenten superficies de falla profundas de tipo esférica, teniendo en cuenta el nivel freático, la variación de los parámetros de resistencia con el cambio de tipo de material y la fuerza sísmica expresada como un

coeficiente pseudo-estático que incrementa las fuerzas inestabilizantes.

Los modelos descritos permiten simular los mecanismos de falla de deslizamientos superficiales y profundos con el objeto de caracterizar la amenaza en la zona de estudio.

### 12.1. Información cartográfica de detalle

Para el levantamiento cartográfico a escala 1:2000 se utilizaron técnicas de restitución con fotogrametría a partir de tomas de fotografías aéreas con drones, y levantamiento con sensores remotos activos tipo LiDAR (*Light Detection and Ranging*).

El LiDAR es una técnica de teledetección óptica que utiliza la luz de láser para obtener una muestra de la superficie de la tierra produciendo información tridimensional precisa a través de una nube de puntos con diferentes valores de elevación. La tecnología LiDAR consta de un sensor óptico activo que transmite rayos láser hacia un objetivo mientras se mueve a través de rutas de topografía específicas. El reflejo del láser del objetivo lo detectan y analizan los receptores en el sensor LiDAR. Estos receptores registran el tiempo preciso desde que el pulso láser dejó el sistema hasta cuando regresó para calcular la distancia límite entre el sensor y el objetivo.

Los sensores utilizados con esta técnica permiten determinar diferentes tiempos de llegada de los haces de luz que se diferencia en colores que representan los periodos de retorno del rayo láser tal como se observa en la Figura 141, es así como se realizan los cálculos necesarios para poder determinar cual de los tiempos es el que corresponde a la superficie y elimina los tiempos que corresponden a los arboles, las líneas eléctricas, incluso algunas estructuras, allí radica la importancia de este sistema y es que arroja un resultado preciso de la superficie del terreno.

Para el levantamiento topográfico con LiDAR se contó con la empresa Aeroestudios S.A.S. En anexo se describen los procesos de la toma de fotografías aéreas, la adquisición de Datos LiDAR y elaboración de productos digitales como Ortofotografía, DTM y DSM para el Antiguo ETCR.

Como productos se obtuvieron fotografías aéreas métricas a color (RGB) con una resolución en terreno (GSD por sus siglas en inglés) de 10cm. A partir del cual se generó el Modelo Digital de Terreno (MDT) con una resolución de 0.5m x 0.5m, y el levantamiento de cuatro (4) puntos de control fotoidentificables amarrados al IGAC con doble determinación de un punto IGAC y una Base

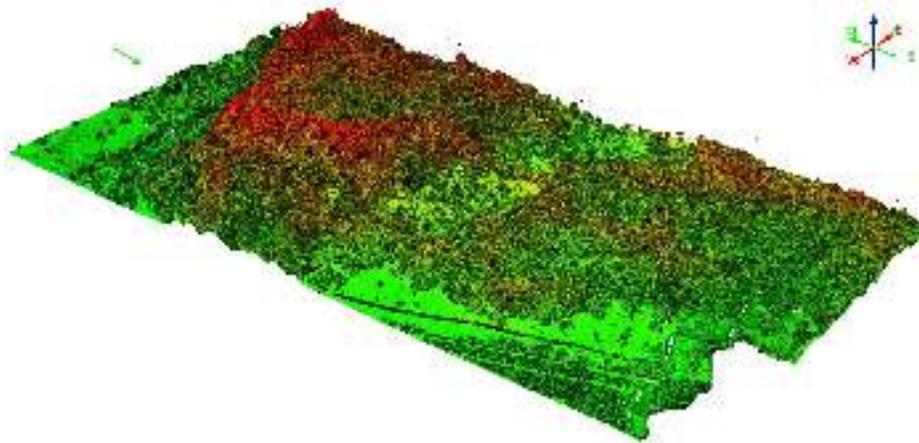


Figura 141: Resultado del trabajo realizado con LIDAR, Elaborado con el software *Quick Terrain Reader* v 8.2.0.

Cors Permanente y un (1) punto de control cinemático.

Los parámetros técnicos utilizados son:

- Sistema de Referencia: **Magna-Sirgas**
- Origen de la Proyección: **Magna-Sirgas-Oeste**
- Unidad de medida: **Metro internacional**
- Datum Vertical: **Buenaventura** .
- Amarre a la red geodésica nacional: **IGAC\_2-CU-1**

Los resultados del levantamiento topográfico con LiDAR en el antiguo ETCR Los Monos se observan en la Figura 142 y en la Figura 143.

## 12.2. Geomorfología Local

La geomorfología es un factor condicionante, expresado a través de la topografía del terreno, que se convierte en un primer insumo fundamental para la identificación de los puntos para la exploración de campo. El S. G. SGC (2016) considera el mapa geomorfológico detallado, como un insumo primordial para la homogeneización de las unidades con características de comportamiento geomecánico similar, junto con el mapa de geología para ingeniería.



Figura 142: Ortofotografía antiguo ETCR Los Monos, Caldono, Cauca

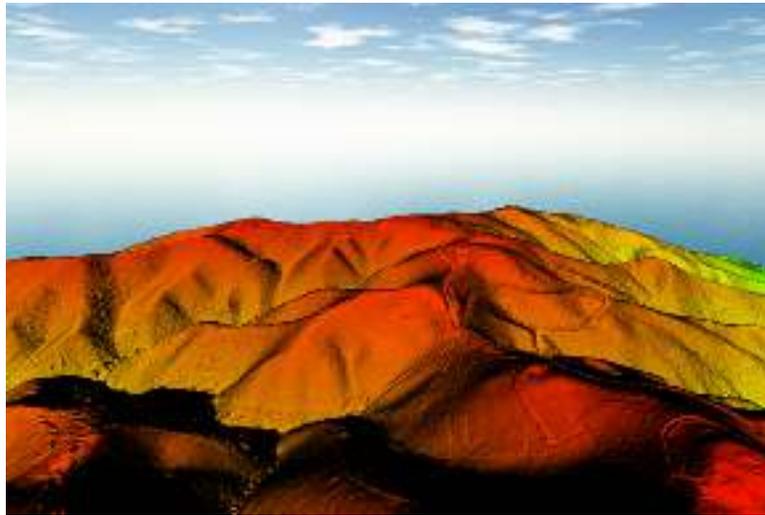


Figura 143: Modelo digital de terreno(DTM), antiguo ETCR Los Monos, Caldono, Cauca

La zona de estudio presenta un comportamiento geomorfológico asociado a la unidad denominada por (SGC, 2014) como Ssc (Sierra Homoclinal).

En la zona de estudio se presentan geformas pertenecientes a un ambiente estructural (Figura 6) cuya morfogénesis está ligada a procesos relacionados con la dinámica interna de la Tierra asociados principalmente al plegamiento y el fallamiento de las rocas, en el caso del predio Los Monos asociado a la falla cauca-romeral, donde la expresión morfológica es definida por la tendencia y

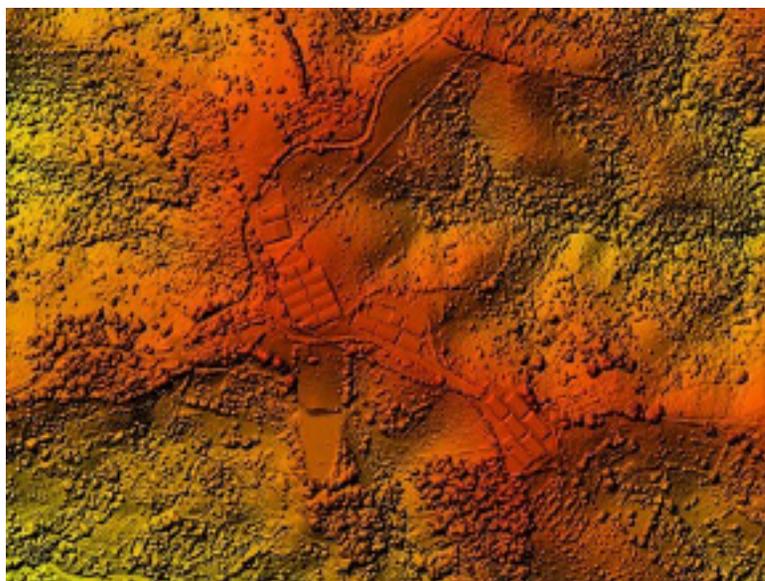


Figura 144: Modelo digital de superficie(DSM) antiguo ETCR Los Monos, , Caldoño, Cauca.

la variación en la resistencia de las unidades (SGC, 2014). Para la escala de estudio detallada se tienen en cuenta las características de las vertientes que conforman la unidad dominante: forma, longitud y pendiente de la ladera.

Para la zona de estudio las condiciones geomorfológicas se asocian a una vertiente compuesta por laderas de pendientes abruptas a moderadas y lomas bajas, desarrolladas sobre suelos residuales y rocas meteorizadas asociadas a las Metasedimentarias Esquistosas (Esquistos verdes de la Mina) (INGEOMINAS (2003)) además, de geformas asociadas a la actividad humana (Figura 145).

Las laderas predominantes en la zona de estudio presentan una forma cóncava y una tendencia a tener una pendiente abrupta con valores entre los  $11^\circ$  y los  $35^\circ$  en los casos más extremos:

**Lacxr-Ladera abrupta corta convexa rugosa:** Se presenta como una ladera corta entre 50-250 m, de aspecto convexo y pendientes abruptas entre  $20^\circ$  y  $45^\circ$ . (Figura 146)

**Laccl-Ladera abrupta corta cóncava lisa:** Se presenta como una ladera corta entre 50-250 m, de aspecto cóncavo, y pendientes abruptas entre  $20^\circ$  y  $45^\circ$  (Figura 147). Esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de Metasedimentarias Esquistosas (Esquistos verdes de La Mina).

**Lamir-Ladera abrupta muy corta irregular rugosa:** Se presenta como una ladera muy corta, con valores variables menores a 50m, irregular y con pendiente abruptas entre  $20^\circ$  y  $45^\circ$ .

**LaMcl-Ladera abrupta moderada cóncava lisa:** Se presenta como una

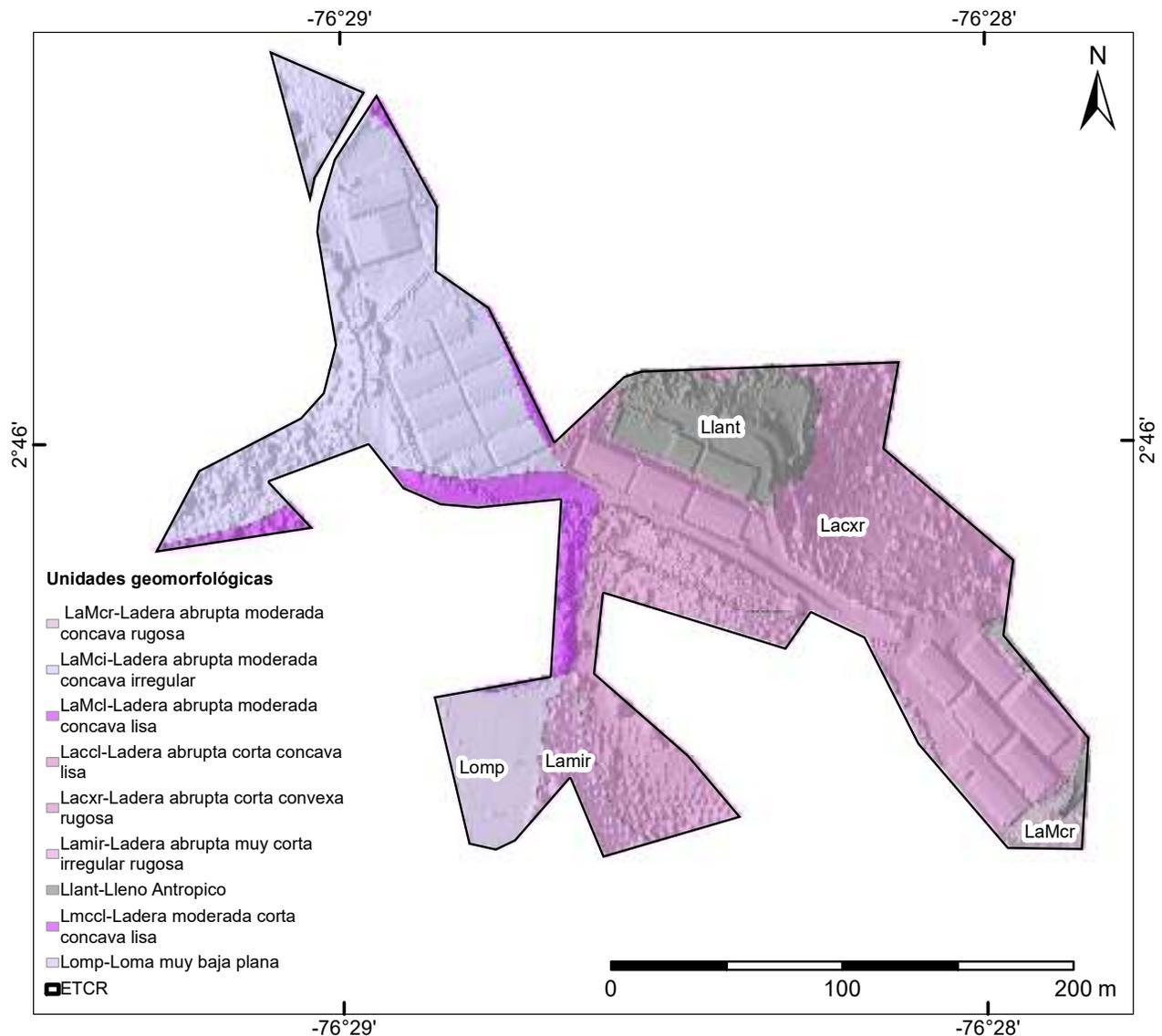


Figura 145: Mapa de unidades geomorfológicas en el antiguo ETCR Los Monos

ladera moderada con valores entre 250-500m, con aspecto cóncavo y con pendientes abruptas entre 20° y 45°. (Figura 148)

**Lomp-Loma muy baja plana:** Se presenta como una loma con valores variables menores a 50m, con un relieve plano y forma plana. (Figura 149)

**LaMci-Ladera abrupta moderada cóncava irregular:** Se presenta como una ladera moderada con valores entre 250-500m, con aspecto cóncavo y con pendientes abruptas entre 20° y 45°.

**Lmcccl-Ladera moderada corta cóncava lisa:** se presenta como una ladera corta con valores entre 50-250m, con aspecto cóncavo y pendientes moderadas entre 11° y 20°.



Figura 146: Lacxr-Ladera abrupta corta convexa rugosa



Figura 147: Laccl-Ladera abrupta corta cóncava lisa

**LaMcr-Ladera abrupta moderada cóncava rugosa:** Se presenta como una ladera moderada con valores entre 250-500m, con aspecto cóncavo y pendientes abruptas entre 20° y 45°.(Figura 151)

**Llant-Lleno Antropico:** Asociada a la remoción de materiales para el asentamiento de las viviendas temporales y demás estructuras civiles se encuentran formas de baja extensión y pendiente, que sobresaltan en la pendiente natural, compuestos por material heterogéneo: residuos, escombros, suelo removido, materia orgánica.(Figura 161)



Figura 148: LaMcl-Ladera abrupta moderada cóncava lisa



Figura 149: Lomp-Loma muy baja plana

### 12.3. Procesos morfodinámicos

En la zona de estudio se identificaron principalmente movimientos en masa superficiales la mayor parte de ellos inactivos, siendo predominantes en la zona de la vía que conduce al predio y a la cancha donde se ven fuertemente influenciados por el corte de la vía, la alta pendiente y la extracción de material para construcción en el talud conformado por suelo residual VI de Metasedimentaria Esquistosa (Figura 153, 154). Dentro del predio se observaron procesos de erosión y socavación en la zona de influencia del lleno antropico localizado en la



Figura 150: LmccL-Ladera moderada corta cóncava lisa



Figura 151: LaMcR-Ladera abrupta moderada cóncava rugosa

parte central del predio asociados a la baja resistencia que presenta el material (Figura 155) (Figura 152).

#### 12.4. Geología para ingeniería

Con el objetivo de definir el conjunto de materiales superficiales (depósitos, suelo, rocas), y definir su comportamiento geomecánico a partir de estimaciones de parámetros de campo y laboratorio, se presenta las exploraciones, toma de muestras y resultados de la exploración realizada.

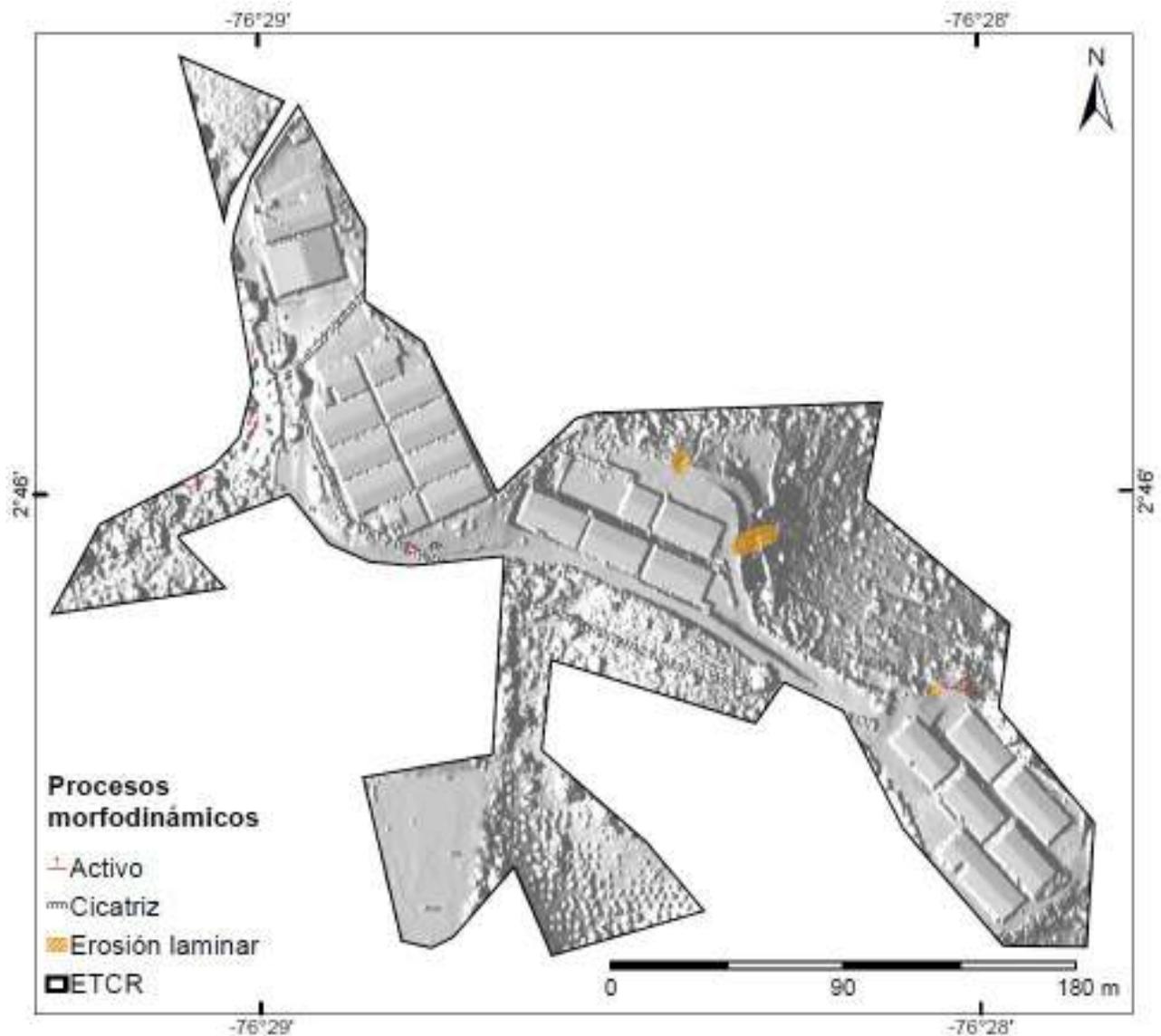


Figura 152: Mapa de procesos morfodinámicos en el antiguo ETCR Los Monos

### 12.4.1. Exploración y parametrización geotécnica

La etapa de exploración geotécnica para la componente de amenaza en el antiguo ETCR Los Monos, está compuesta por 7 puntos de apiques y 9 puntos de perforación (ver Figura 156), a esta información se suma la obtenida en la exploración ejecutada para las construcciones civiles (PTAP y PTARD) las cuales son 6 perforaciones con una profundidad de 6m.

La exploración y los ensayos empleados en la caracterización geotécnica obedecen a las recomendaciones definidas en la exploración detallada de la Guía del Servicio Geológico Colombiano (S. G. SGC, 2016). Igualmente, se considera la



Figura 153: Proceso morfodinámico en la vía



Figura 154: Proceso morfodinámico en la vía

exploración geotécnica descrita en el título H de la NSR-10 (H.3.2.3) en cuanto a la cantidad mínima de sondeos por realizar en las estructuras hidráulicas



Figura 155: Erosión en lleno antropico Qll

(PTAP y PTARD). Con respecto al tipo de ensayos empleados; se considera las pruebas requeridas para determinar las propiedades básicas y detalladas del suelo a partir de los lineamientos de la NSR-10 (H 3.3.3), estos ensayos son distribuidos espacialmente en la exploración directa según el área del espacio a explorar y las unidades geológicas superficiales identificadas en el antiguo ETCR.

La distribución de los puntos exploratorios fue orientada a caracterizar el subsuelo que subyace las zonas donde se desarrolla actualmente la ocupación del predio teniendo en cuenta la topografía, geomorfología, cambios de pendiente, presencia de zonas saturadas, cambios litológicos y áreas con presencia de procesos morfodinámicos y atributos observados a través de recorridos en campo.

Las dimensiones de los apiques son 1mx1m, con profundidad de 1,5m, mientras que las perforaciones mecánicas a percusión a profundidades de 3m y 6m con diámetro de 55mm tomando muestras cada 50cm en shelby (muestra inalterada) o en cuchara partida (muestra alterada). En la Figura 157 se muestra

a modo de ilustración el sistema de apiques y perforaciones realizadas.

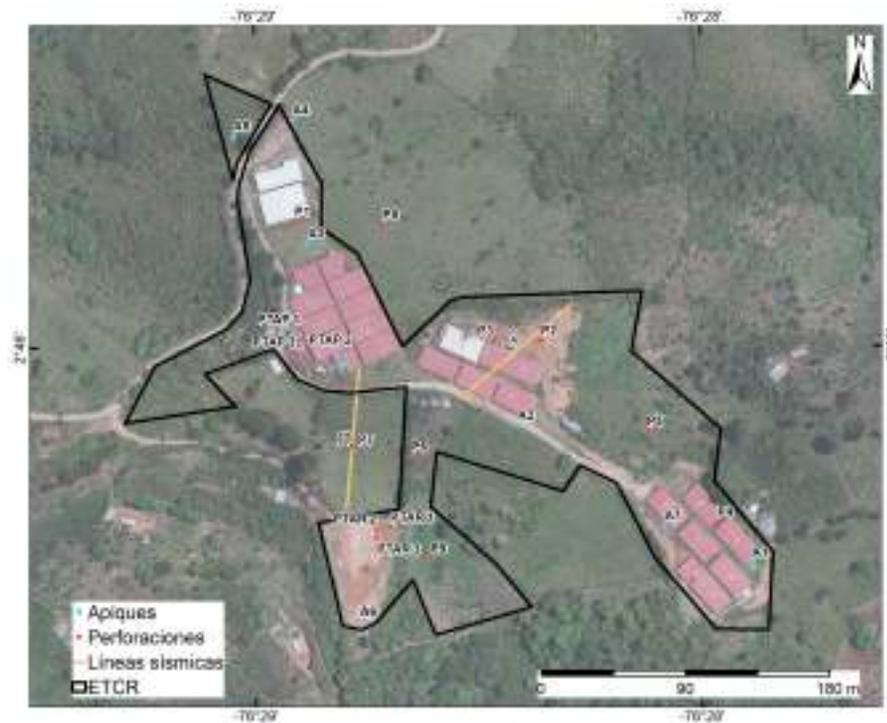


Figura 156: Ubicación exploración ejecutada



(a)



(b)

Figura 157: Ilustraciones de apiques y perforaciones. (a) Perforaciones a 6m y 3m de profundidad con diámetro de 55mm con toma de muestra alterada o inalterada cada 50cm. (b) Apique con dimensiones 1x1,5m con toma de muestra inalterada a 0,5m de profundidad y alterada a 1,5m.

### 12.4.2. Unidades geológicas superficiales

En el antiguo ETCR Los Monos se identificaron 2 unidades geológicas superficiales (UGS), las cuales corresponden al suelo residual asociado la unidad de roca Esquistos Verdes de la Mina: Metasedimentarias Esquistosas (INGEOMINAS, 2003) y depósitos de origen antrópico Figura (158).

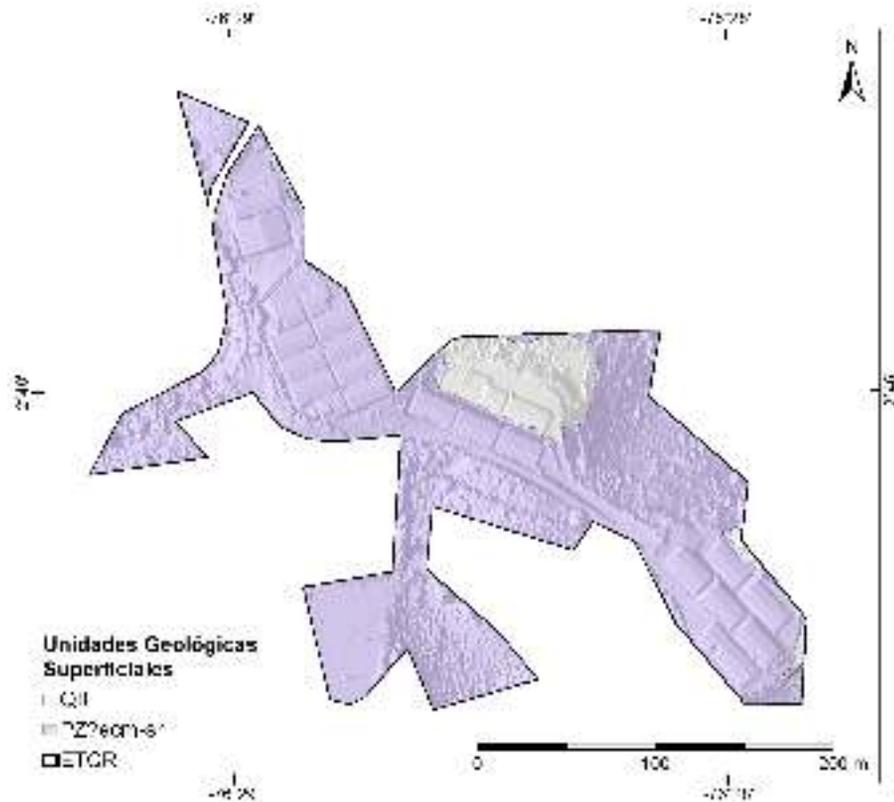


Figura 158: Mapa de unidades geológicas superficiales (UGS) en el antiguo ETCR Los Monos. Depósitos Antrópicos (Qll), Suelo Residual VI- Metasedimentaria Esquistosa (PZ?ecm)

El material superficial que predomina en el antiguo ETCR Los Monos, corresponde a suelo *In Situ*, específicamente al horizonte VI - Suelo residual de Metasedimentarias Esquistosas del perfil de meteorización según la nomenclatura propuesta por Dearman (1974), ocupando el 96 % del predio. Los depósitos cuaternarios antrópicos ocupan un 4 % del predio y están asociados a la remoción y adecuación del terreno para el asentamiento de las viviendas provisionales.

El suelo residual de Metasedimentarias esquistosa correspondiente al nivel superior del perfil de meteorización; se observó en la totalidad de apiques y afloramientos siendo la unidad dominante en la zona de estudio (Figura 158). Corresponde a un limo de alta plasticidad de color naranja a color amarillo con tonalidades rosa (zonas de oxidación) completamente meteorizado, plástico

y húmedo (Figura 159), en algunas ocasiones mezclado con fragmentos testigos de roca mediana a altamente meteorizados asociados al frente de meteorización (Figura 160).

El material de origen antrópico fue detectado en el sondeo P2 y forma superficial en el sudeste y noroeste del predio, se extiende en profundidad entre 1.0 y 11.0m, siendo el último la profundidad evidenciada en P2 en la zona central del predio (Figura 161a, 161c, 161d) este material conforma principalmente los terrenos de vías y zonas aledañas a las viviendas donde se han depositado materiales de origen heterogéneo (Figura 161b). Están compuestos por limos arenosos de color naranja a café oscuro. Contiene restos de material orgánico, raíces, basuras (Figura 161b), escombros y fragmentos de roca.



Figura 159: Suelo Residual VI Metasedimentaria Esquistosa (PZ?ecm-sr)

### 12.4.3. Prospección sísmica

La prospección sísmica se basa en el estudio de propagación de las ondas sísmicas en el terreno con el fin de determinar el perfil de velocidad de propagación de onda de corte  $V_s$  en profundidad. La caracterización geofísica se realiza en función de la rigidez de los materiales que componen el subsuelo por medio de ensayos de ondas superficiales, para estimar el perfil stratigráfico. Con los parámetros estimados se determina el tipo de perfil de suelo (Tabla. 68), espesor y parámetros sísmicos de cada capa. Además, los parámetros geomecánicos

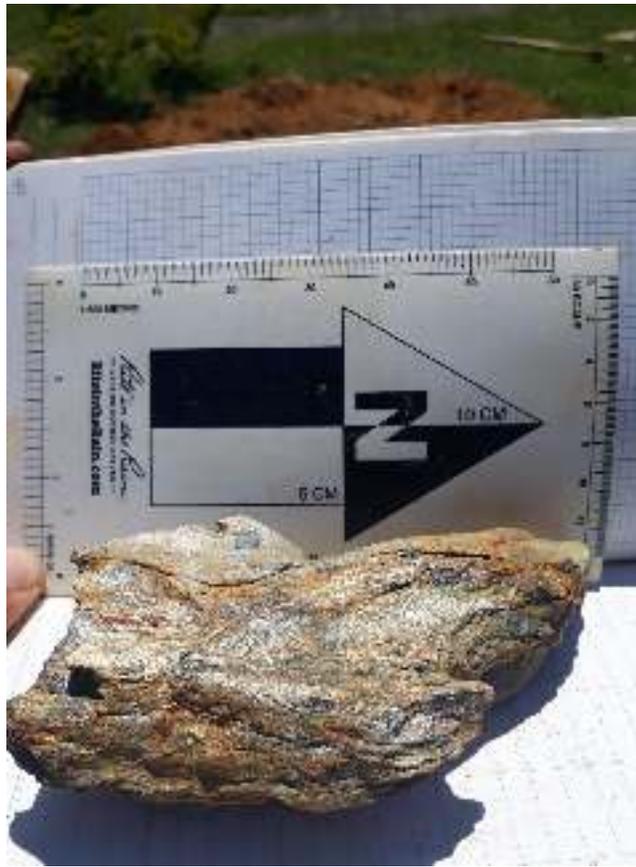


Figura 160: Bloque meteorizado de Metasedimentaria Esquistosa (PZ?ecm)

son estimados en base a las propiedades elásticas del terreno descritas mediante relaciones entre esfuerzo–deformación. La ubicación de las líneas sísmicas ejecutadas se observa en la Figura 156, realizadas con 24 geófonos separados cada 5m.

Se emplean dos tipos de ensayo MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) y el ensayo ReMi (*Refraction Microtremor*), los cuales proporcionan como resultado el perfil de velocidad de propagación de onda de corte en profundidad.

- Ensayo MASW

El método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales es un método cuyas principales ventajas son emplear ondas Rayleigh generadas de manera activa; producidas artificialmente para definir la velocidad de propagación de las ondas sísmicas superficiales y definir la configuración del subsuelo. La fuente emisora se genera mediante golpes con una masa en lugares previamente definidos denominados puntos de tiro, la ondas se propagan hasta los



Figura 161: Depósitos Antrópicos en el antiguo ETCR Los Monos

Tabla 68: Clasificación perfiles del suelo a partir de Tabla A.2.4.4 NSR-10 (de Ingeniería Sísmica, 2010)

Tipo de perfil	Descripción	Rango $V_s30(m/s)$
A	Roca competente	$\geq 1500$
B	Roca de rigidez media	760 – 1500
C	Suelo muy denso o roca blanda	360 – 760
D	Suelo rígido	180 – 360
E	Suelo blando	$180 \geq$
F	Suelos especiales (licuables, colapsables, arcillas muy plásticas, suelos orgánicos)	

receptores (geófonos) (Figura 162). Además, el método puede incorporar información proveniente de los modos superiores de vibración, generando modelos de velocidad de mayor resolución (Park, Miller, y Xia, 1999).

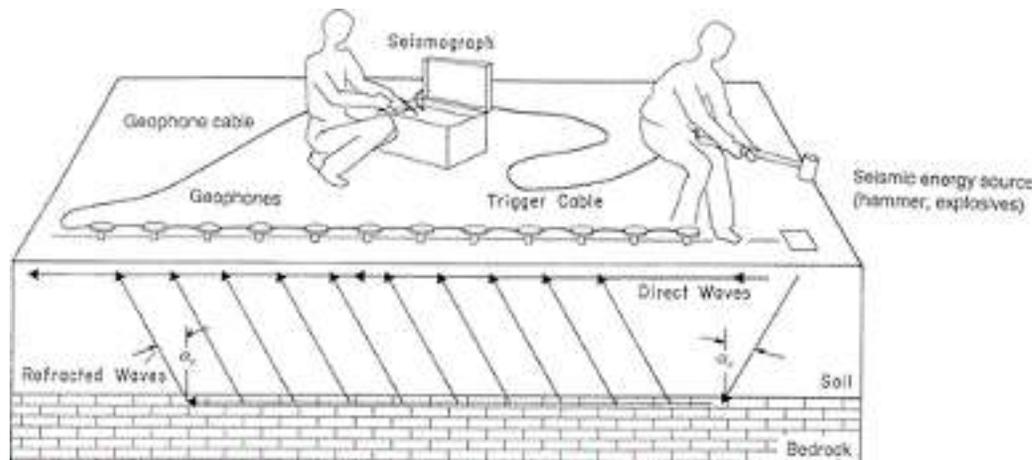


Figura 162: Esquema ensayo de refracción sísmica (ASTM, 2011)

#### ■ Ensayo ReMi

Es un método de análisis por Refracción de Microtremores que estima la velocidad propagación de ondas de corte  $V_s$  en profundidad, basado en la determinación de la dispersión en la propagación de ondas superficiales. Se realiza mediante un tendido de geófonos y sismógrafo digital. Como ventaja sobre otros tipos de ensayos geofísicos, se puede utilizar como señal generadora de ondas, las vibraciones ambientales, o vibraciones inducidas por actividades antrópicas (Louie, 2001).

Como resultado se presentan los perfiles bidimensionales (2D) para cada una de las líneas sísmicas en un modelo simplificado donde se discriminan cada una de las capas que conforman el subsuelo donde se identifica  $V_s$ , espesor y abscisa de la línea sísmica.

En el perfil sísmico de la línea 1 (Figura. 163) se observa superficialmente suelo de consistencia blanda a media hasta una profundidad aproximada de 3m caracterizado por  $V_s$  menor a 210m/s. Avanzando a profundidad se presenta una capa semi-rígida con  $V_s$  entre 210 y 320m/s el cual se extiende hasta aproximadamente 10m. Luego se registra una transición a suelo muy denso con  $V_s$  hasta 490 m/s. Hasta la máxima profundidad explorada se presentan materiales que aumenta gradualmente  $V_s$  hasta los 850 m/s aproximadamente, característica de un suelo muy denso a roca blanda.

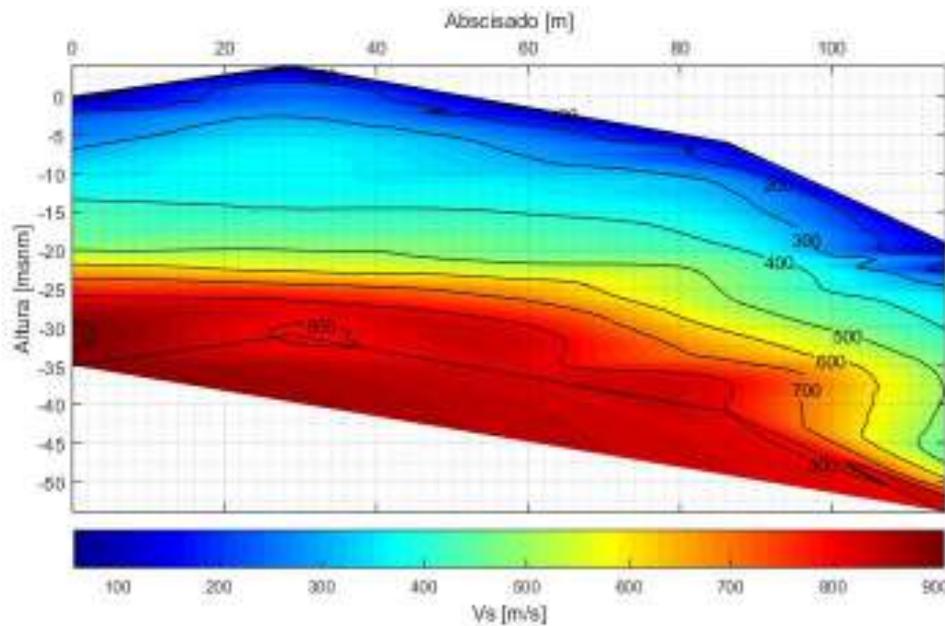


Figura 163: Perfil 2D  $V_s$  línea 1

En la línea sísmica 2 (Figura. 164) se presenta suelo de consistencia blanda con  $V_s < 180\text{m/s}$ , el cual se extiende aproximadamente por 4m. Posteriormente  $V_s$  incrementa hasta los 280m/s evidencia de un suelo semi-rígido a rígido, el cual se extiende hasta 12m de profundidad. Luego se observan  $V_s$  hasta 480 m/s transición a suelo muy denso hasta los 23m. Finalmente hasta la máxima profundidad se presenta una transición entre suelos muy densos a roca blanda, con valores de  $V_s$  hasta 980m/s.

A partir de los ensayos ejecutados se determina los diferentes perfiles de suelos acorde a la velocidad de onda en corte en los 30m superficiales  $V_{s30}$ , se definió para cada una de las líneas sísmicas el perfil del suelo acorde a lo determinado por la Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-10 (Tabla. 69).

Tabla 69: Perfil de suelo

Línea	$V_{s30}(m/s)$	Tipo de Perfil (NSR-10)
1	369	C
2	324	D

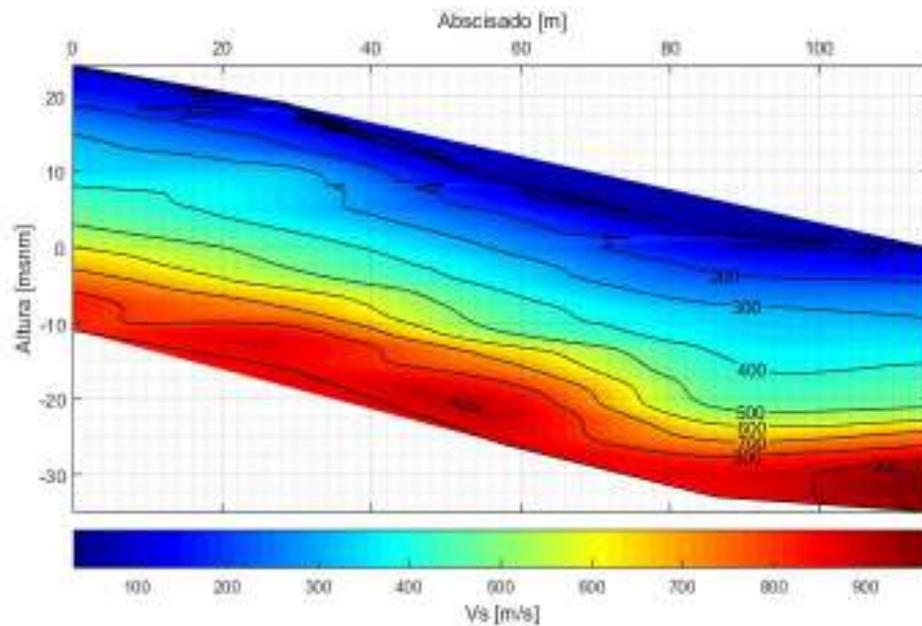


Figura 164: Perfil 2D  $V_s$  línea 2

#### 12.4.4. Análisis de laboratorio

A partir de la exploración directa realizada en el espacio se definió la ejecución de una serie de ensayos de laboratorio en muestras alteradas e inalteradas, con el propósito de caracterizar física y mecánicamente los materiales que conforman el subsuelo explorados en los distintos apiques y perforaciones. En la tabla 70 se presentan los ensayos y cantidad realizados como parte de la exploración geotécnica contemplada en la caracterización detallada para la evaluación de la amenaza y el estudio geotécnico de las plantas de tratamiento de agua potable y residual.

Tabla 70: Distribución ensayos de laboratorio

Ensayo	Cantidad	Normas
Humedad natural	73	ASTMD2216
límites de consistencia	36	ASTMD4318
Granulometría por tamizado y lavado sobre la malla No.200	29	ASTMD422
Peso unitario	39	ASTMD7263
Consolidación unidimensional	5	ASTMD2435
Colapso o expansión unidimensional	3	ASTMD4546
Compresión simple o confinada	9	ASTMD2166
Corte directo - Consolidado drenado	9	ASTMD2080
Triaxial- Consolidado no drenado (CIU-TXC)	4	ASTMD4767

Adicionalmente, se presentan en las Tablas 71 y 72 un resumen de los parámetros y propiedades obtenidos por los distintos ensayos para cada muestra y profundidad de la muestra recuperada. Dentro de los parámetros evaluados se tiene:

- ID: identificador de la exploración
- P: profundidad en metros (m)
- LL: limite liquido
- LP: limite plástico
- IP: índice de plasticidad
- % G: porcentaje gravas
- % A: porcentaje arenas
- % F: porcentaje finos
- USCS: sistema unificado de clasificación de suelos
- $\gamma_h$ : Peso unitario húmedo ( $kN/m^3$ )
- $\gamma_s$ : Peso unitario seco ( $kN/m^3$ )
- Su: Resistencia a la compresión uniaxial no drenada (kPa)
- $c'$ : cohesión (kPa)
- $\phi$ : ángulo de fricción (grados) item k: conductividad hidráulica saturada (m/s)

Tabla 71: Recopilación de parámetros obtenidos mediante ensayos de laboratorio

ID	P (m)	LL	LP	IP	%G	%A	%F	USCS	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	Su (kPa)	c' (kPa)	$\phi$ (°)	k (m/s)
AP-01-M1	0,5	33	29	4	43,4	24,2	32,4	GM	20,2	17,4				1,5E-06
AP-01-M4	1,5	36	33	3	52,8	15	32,2	GM	19,2	16,3		63	31	
AP-01-M6	1,5								17,4	14,7				
AP-02-M1	0,5	35	30	5	37,6	32,4	30	GM						
AP-02-M2	1,3	37	34	3				ML						
AP-03-M1	0,5								12,9	6		48	31	
AP-03-M2	1,3	68	59	9	0	4,3	95,7	MH						
AP-04-M1	0,5								11,7	5				
AP-04-M2	1,3	84	69	15	0,7	7	92,3	MH						
AP-05-M1	0,5	74	63	11	0	13,5	86,5	MH	12,4	5,8	69,5			3E-07
AP-06-M1	0,5	51	44	7	0,2	7,4	92,4	MH	13,9	7,5				2,5E-07
AP-07-M1	0,5	55	41	14	0,6	11,2	88,2	MH	17,4	12,7		48	25	
AP-07-M2	1,3	33	28	5	19	13,9	67,1	ML						
AP-07-M3	1,4								16,5	14,6				
PP-01-M2	1,7	41	38	3	32,6	21,2	46,2	GM				30	31	
PP-01-M3	2,15	72	58	14				MH						
PP-01-M4	2,6								12,3	5,8				
PP-01-M5	3,05	56	47	9	0	4,8	95,2	MH						
PP-02-M2	2,25								12,7	5,5	34,3			
PP-02-M3	3,25	53	51	2	1,1	20	78,9	MH						
PP-02-M4	4,25								14	6,5				
PP-02-M6	6,25	47	39	8	3,4	20,2	76,4	ML	13,4	6,2		0	35	
PP-02-M8	7,75								11,6	4,8				
PP-02-M9	8,15	46	40	6				ML						
PP-02-M10	8,6								14	6,1				
PP-02-M12	9,6								13,9	6,4				
PP-02-M13	9,9	57	53	4				MH						
PP-02-M14	10,5								12,3	5,8				
PP-02-M15	10,8	72	58	14				MH						
PP-03-M1	1,25								11,9	5,5				
PP-03-M3	3,25	59	49	10	0	28,2	71,8	MH	11,6	5,5		46	35	
PP-04-M1	1,25	49	45	4	0,6	15,1	84,3	ML	16,1	10,1	45,4			
PP-04-M3	3,25								15,3	9,5				
PP-05-M1	1,25								11,5	6,2				
PP-05-M3	3,25	47	45	2	0,1	28,8	71,1	ML	13,3	7,2	38,6			
PP-06-M1	1,25	78	65	13	0	9,1	90,9	MH	11,7	5,9	70			
PP-06-M3	3,25								11,2	4				
PP-07-M1	1,25	55	48	7	0	14,7	85,3	MH	12,1	5,5	72			
PP-07-M3	3,25								12,7	5,7				
PP-08-M1	0,7	40	35	5	0,1	51,8	48,1	SM	13,1	6	30,9			
PP-08-M3	1,6								12,9	5,6				
PP-08-M4	2,05	38	37	1				ML						
PP-08-M5	2,5								12	5,5				
PP-09-M1	1,25	59	54	5	0	10,7	89,3	MH	13,8	6,7		5	36	
PP-09-M2	2,25	57	53	4				MH						
PP-09-M3	3,25											5	36	

### 12.4.5. Zonas geotécnicas homogéneas

De acuerdo con la investigación geológica y geomorfológica, la exploración del subsuelo y los ensayos de laboratorio se asociaron los materiales observados en las unidades geológicas superficiales en zonas geotécnicas homogéneas.

Con base en los ensayos de laboratorio y la exploración directa se caracteriza los parámetros y propiedades de las zonas geotécnicas homogéneas requeridos en los modelos físicos empleados en la evaluación de la amenaza por movimientos en masa.

Tabla 72: Recopilación de parámetros obtenidos mediante ensayos de laboratorio - Plantas

ID	P (m)	LL	LP	IP	%G	%A	%F	USCS	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	Su (kPa)	c' (kPa)	$\phi$ (°)	k (m/s)
PTAP-01-M1	0,75											0	37	
PTAP-01-M3	2,75	33	31	2	0,2	71,3	28,5	SM	13,7	7,1		28	29	
PTAP-01-M6	5,75	49	35	14	0	3,7	96,3	ML	15,7	10,6		0	37	
PTAP-02-M2	1,75	37	34	3	0	35,8	64,2	ML						
PTAP-02-M5	4,75								16	10,4				
PTAP-03-M2	1,75								14,3	7,3				
PTAP-03-M5	4,75	31	26	5	0,2	42,3	57,5	ML						1,9E-07
PTAR-01-M1	0,75	57	48	9	0	39,2	60,8	MH	10,3	4,3				
PTAR-01-M3	2,75								15,4	10,4	30,3			
PTAR-02-M1	0,75								16,3	10,1		34	30	
PTAR-02-M3	2,75	29	21	8	10,1	12,7	77,2	CL						1,3E-07
PTAR-02-M5	4,75								19,2	15,7	50	94	30	
PTAR-03-M2	1,75	39	28	11	21	33,2	45,8	SM						
PTAR-03-M5	4,75	27	19	8	14,1	36,2	49,7	SC						
PTAR-03-M6	5,75	25	24	1	19,1	30,8	50,1	ML						

Inicialmente, se consolida la información geotécnica disponible de cada zona con los distintos apiques y perforaciones según la ubicación y profundidad de la exploración. A partir de los ensayos de granulometría por tamizado e hidrómetros y límites de consistencia se define el material predominante en la zona según la clasificación unificada de suelos (U.S.C.S), con base en los porcentajes del material (%Gravas, %Arenas y %finos) obtenido en las distintas muestras y las propiedades plásticas según la carta de plasticidad.

Con respecto a las propiedades de resistencia se contemplaron los ensayos mecánicos donde el espécimen se somete al proceso de falla bajo el incremento de carga, en los cuales se determinan parámetros de resistencia para esfuerzos efectivos definido por la envolvente de falla de Mohr-Coulomb (cohesión y ángulo de fricción) bajo las distintas condiciones de falla impuestas. Por lo tanto, los parámetros de resistencia adoptados en las distintas zonas Geotécnicas son determinados a partir de los ensayos de compresión simple, corte directo y triaxial.

Igualmente, se estimaron los parámetros de resistencia a profundidad mediante los valores de resistencia a la penetración estándar, *Standard Penetration Test* conocido como SPT (N golpes/pie). La metodología empleada corresponde a la propuesta por Gonzalez (1999), en la cual se obtiene de manera aproximada los parámetros efectivos de cohesión ( $c'$ ) y ángulo de fricción ( $\phi'$ ) drenados mediante el uso de correlaciones con los números de golpes (N-SPT) corregidos por factores de confinamiento y energía propuestos por Bowles y cols. (1996). El método de Gonzalez (1999) fue implementando en los distintos valores de N-SPT registrados a profundidad en las perforaciones ejecutadas que alcanzaron los 11m, considerando la exploración ejecutada para las obras civiles. No

obstante, se consideró únicamente el valor aproximado de  $\phi'$  obtenido por la metodología, al proveer un mayor desempeño y aproximación de las correlaciones para materiales granulares o intermedios, en comparación con materiales cohesivos (Montenegro, 2014). Para mayor detalle en la metodología empleada se sugiere consultar el Anexo (Correlaciones con N-SPT) del estudio de las plantas de tratamiento de agua potable y residual.

Como parte de la caracterización hidráulica de las zonas geotécnicas homogéneas se estimaron los valores de conductividad hidráulica saturada  $K_s$  a partir de diferentes aproximaciones; se contempla los valores aproximados de los ensayos de consolidación unidimensional. Adicionalmente, se emplea funciones de Pedotransferencia (PTF) mediante el modelo ambiental SPAW (Saxton, Johnson, y Shaw, 1974), con el propósito de estimar la conductividad hidráulica saturada a partir de la textura del suelo (Wösten, Pachepsky, y Rawls, 2001). Igualmente, se considera como límites el rango de valores reportados en <http://www.geotechdata.info/parameter/>.

A continuación se presentan los valores y variación de los parámetros asignados a cada una de las zonas geotécnicas homogéneas mediante la metodología descrita anteriormente, la variación de los parámetros se establece a partir de estadísticos de tendencia central (media, moda y mediana).

**Zona 1 – Antrópico (QII):** Las áreas que comprenden la zona presentan suelos compuestos por limos de alta plasticidad (MH) y en menor proporción limos de baja plasticidad (ML), tal como se muestra en la distribución de los diferentes puntos en la carta de plasticidad (Figura 165). En la exploración ejecutada en esta zona se presenta valores de N-SPT entre 2 y 17 golpes/0,3m. Los parámetros de resistencia reportados presentan una media de 11,5 kPa para la cohesión y  $35^\circ$  para el ángulo de fricción. En cuanto a la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) el rango de valores considerados oscila entre  $5 \times 10^{-8}$  y  $1 \times 10^{-10}$  m/s.

**Zona 2 – PZecM:** Esta zona presenta gran variabilidad granulométrica de los puntos explorados, compuestos en su mayoría por limos de alta plasticidad (MH) y limos de baja plasticidad (ML), se presenta en menor proporción gravas limosas (GM) y arenas limosas (SM); siendo posible encontrar arcilla de baja plasticidad (CL) y arena arcillosa (SC), tal como se muestra en la distribución de los diferentes puntos en la carta de plasticidad (Figura 166). Los valores de N-SPT oscilan entre 3 y 15 golpes/0,3m y se presenta un máximo de 30

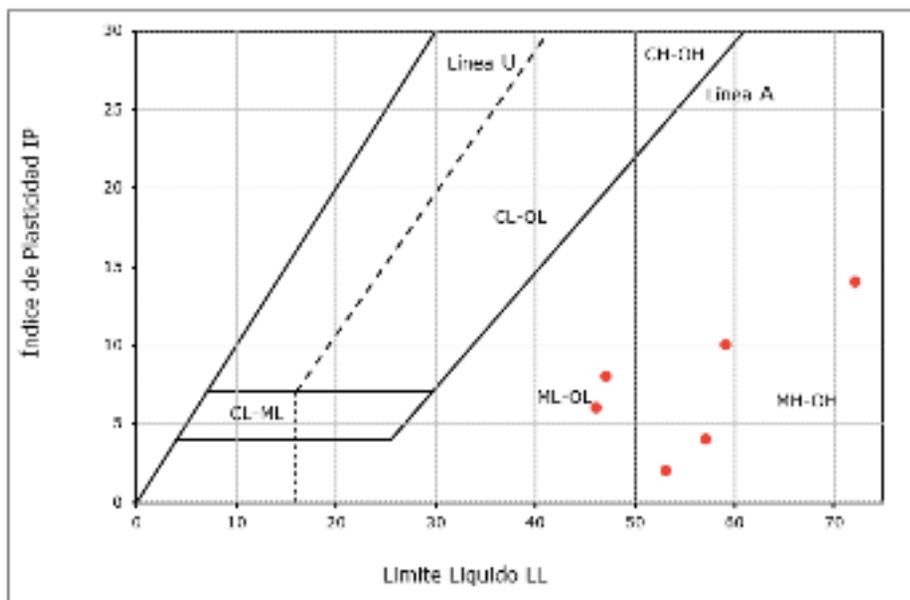


Figura 165: Variabilidad en los límites de consistencia de la zona 1 mediante la Carta de plasticidad de Casagrande.

golpes/0,3 en el suroeste (PTAR) . Los parámetros de resistencia reportados presentan una media de 23,4 kPa y 32,1° para la cohesión y ángulo de fricción, respectivamente. En cuanto a la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) el rango de valores considerados oscila entre  $1,5 \times 10^{-8}$  y  $1 \times 10^{-10}$  m/s.

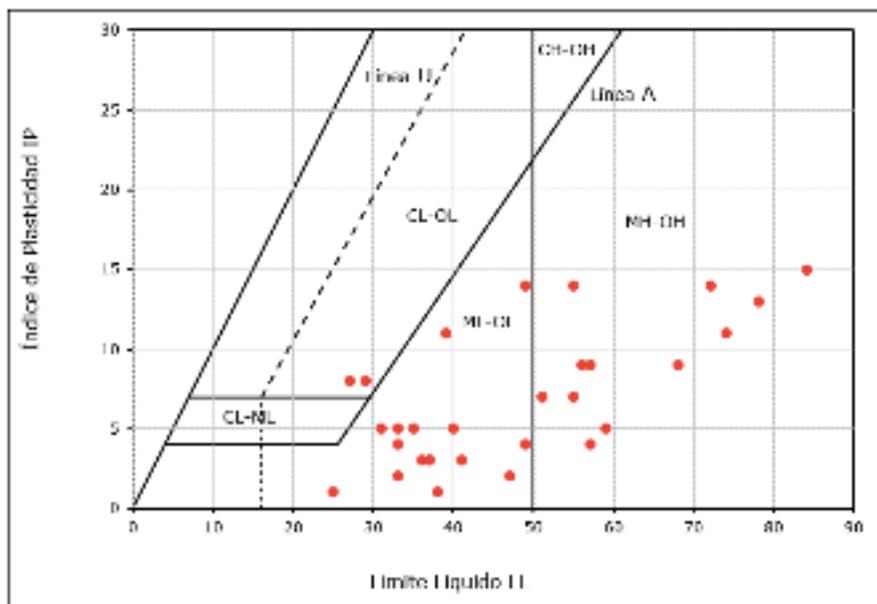


Figura 166: Variabilidad en los límites de consistencia de la zona 2 mediante la Carta de plasticidad de Casagrande.

En la tabla 73 se presentan las propiedades y el tipo de suelo adoptados para las zonas geotécnicas homogéneas empleadas en los posteriores análisis de estabilidad. El tipo de suelo corresponde al material predominante en la zona, en cuanto a los parámetros de resistencia ( $c'$  y  $\phi'$ ) y el peso unitario húmedo ( $\gamma_h$ ) se optó por emplear el valor de la mediana de los distintos valores en cada zona, y para la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) se empleo el valor de la media estimado de las distintas aproximaciones.

Tabla 73: Parámetros geotécnicos para las unidades geológicas superficiales

Zona	Clasificación U.S.C.S	$c'$ (kPa)	$\phi^\circ$	$\gamma_h(kN/m^3)$	$K_s(m/s)$
1 – Antrópico (Qll)	MH	0	35	12,7	$3,4 \times 10^{-6}$
2 – PZecM	MH	30	31	13,1	$1,26 \times 10^{-6}$

## 12.5. TRIGRS

### 12.5.1. Amenaza por movimientos en masa superficiales

En este tipo de movimientos en masa, el material desplazado suele ser de poco espesor, con la influencia de una deformación interna prácticamente nula, movilizándose sobre una superficie de falla paralela a la pendiente, que en ocasiones puede ser escalonada (Cruden, 1996; Hutchinson, 1988). Generalmente, la relación profundidad/longitud (D/L) es menor de 0,1, según Skempton y Hutchinson (1969), debido principalmente a la disposición de los horizontes de suelo, en los que la capa más superficial se encuentra superpuesta a una capa con permeabilidad inferior, permitiendo el desarrollo de un plano de falla paralelo a la superficie (Cruden, 1996; Sidle y Ochiai, 2013). Los movimientos en masa con características planares, no son autoestabilizantes, lo que ocasiona que la velocidad del movimiento pueda ser muy alta, teniendo en cuenta la inclinación y extensión de la superficie (SGC, 2017). Estos movimientos son detonados principalmente eventos intensos de lluvia de corta duración, en los que se reduce considerablemente la succión matricial existente entre las partículas del suelo, relacionado con el incremento en la humedad sobre la zona parcialmente saturada, aumentando las presiones de poros, lo cual genera pérdida en la resistencia al cortante del material (Li, Yue, Tham, Lee, y Law, 2005; Rahardjo, Lim, Chang, y Fredlund, 1995). Debido a esto, se plantea la evaluación de este tipo de movimiento superficial de naturaleza traslacional, mediante el uso del modelo de talud infinito, aplicando el modelo de base física TRIGRS (Figura

167).

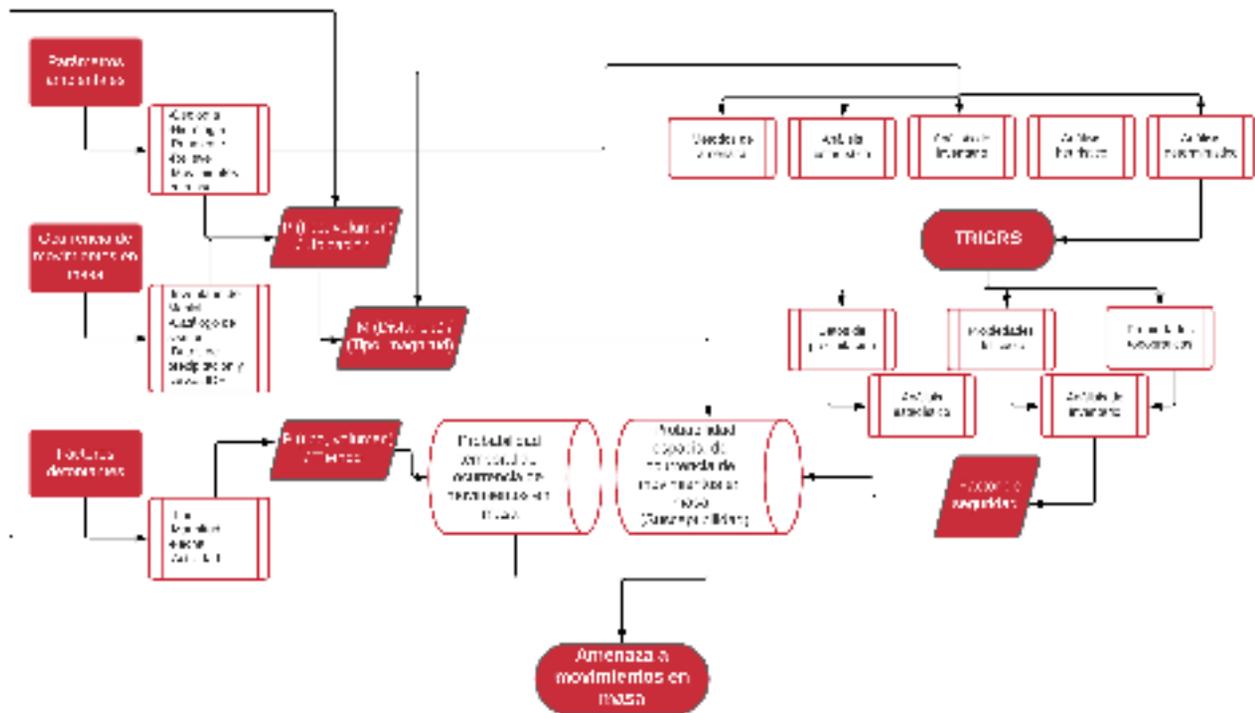


Figura 167: Esquema metodológico de la evaluación de amenaza empleando TRIGRS como modelo de amenaza. Adaptado de van Westen y cols. (2008)

El modelo de base física TRIGRS es un programa en lenguaje Fortran que evalúa la distribución temporal y espacial de movimientos en masa superficiales detonados por lluvia, por medio del cálculo de los cambios transitorios de la presión de poros, por incidencia de frentes húmedos y su incidencia en la variación del factor de seguridad (Baum y cols., 2008).

El modelo se basa en el cálculo de los cambios en la succión matricial para la zona parcialmente saturada y la presión de poros, ocasionados por la infiltración de la lluvia y su incidencia en la variación del factor de seguridad. El programa modela la infiltración del agua lluvia con rangos de duración que varían desde horas hasta días, usando una solución analítica a las ecuaciones diferenciales parciales que representan el flujo unidimensional vertical en materiales homogéneos e isotrópicos, tanto para condiciones saturadas como no saturadas, por medio de la solución lineal de las ecuaciones de Richards (1931) y el flujo del agua en el suelo, como resultado de la sumatoria del estado estacionario y el componente transitorio asociado al evento de lluvia analizado. A continuación, se muestra la ecuación de Richards (12.1), que describe el proceso de infiltración

para una superficie inclinada:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \cdot [K(\psi) \cdot (\frac{1}{\cos^2 \delta} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial Z} - 1)] \tag{12.1}$$

Donde,  $Z$  es la profundidad bajo la superficie del terreno (dirección de la coordenada vertical, positiva hacia abajo),  $(\psi)$  es la cabeza de presión,  $K(\psi)$  es la función de la conductividad hidráulica y  $(\delta)$  el ángulo del talud (Figura 168).

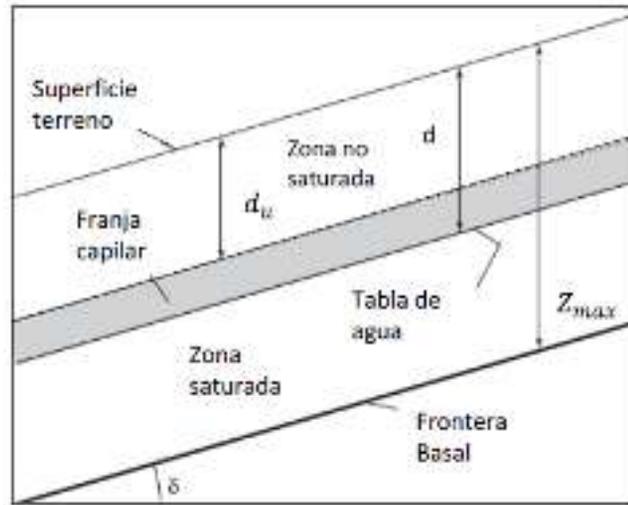


Figura 168: Condiciones hidrológicas en los estratos superficiales del suelo. Adaptado de Baum y cols. (2008)

TRIGRS trata la infiltración en una capa superficial no saturada usando una solución analítica de la ecuación de Richards dada por Srivastava y Yeh (1991), emplea el modelo de Gardner (1958) que involucra los parámetros hidráulicos de las siguientes ecuaciones:

$$K(\psi) = K_s \exp(\alpha \cdot \psi^*) \tag{12.2}$$

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \exp(\alpha \cdot \psi^*) \tag{12.3}$$

Donde  $(\psi)$  es la cabeza de presión;  $(\psi^*) = (\psi) - (\psi_0)$ , con  $(\psi_0)$  como una constante ( $(\psi_0) = 0$  o  $(\psi_0) = -1/(\alpha)$ );  $K(\psi)$  es la función de la conductividad hidráulica,  $(K_s)$  la conductividad hidráulica saturada;  $(\theta)$  es el contenido volumétrico de agua,  $(\theta_r)$  el contenido de agua residual,  $(\theta_s)$  el contenido de agua en saturación y  $(\alpha)$  es la inversa de la cabeza de entrada de aire o inversa de la altura del ascenso capilar en el nivel freático.

TRIGRS emplea un modelo de talud infinito unidimensional para calcular el factor de seguridad FS, de acuerdo a Taylor (1948):

$$FS(Z, t) = \frac{\tan \phi}{\tan \delta} + \frac{c' - \psi(Z, t) \cdot \gamma_W \cdot \tan \phi'}{\gamma_S \cdot Z \cdot \sin \delta \cdot \cos \delta} \quad (12.4)$$

Donde ( $c'$ ) es la cohesión efectiva del suelo, ( $\phi'$ ) el ángulo de fricción efectivo, ( $\gamma_W$ ) el peso unitario del agua, ( $\gamma_S$ ) peso unitario del suelo y  $\psi(Z, t)$  la cabeza de presión en función de la profundidad y el tiempo. En Baum y cols. (2008) se tiene información detallada del modelo TRIGRS.

Los parámetros usados para la implementación del modelo fueron: Las condiciones topográficas de la zona, mapa de espesor del suelo, propiedades mecánicas e hidrológicas del suelo, condiciones de lluvia como factor detonante y las condiciones iniciales del agua en el suelo. La topografía de la zona está representada por modelo digital de elevación con una resolución espacial de 0.5x0.5 obtenido por LIDAR (Figura FOTOLIDAR) las direcciones de flujo y variables morfométricas: pendiente fueron obtenidas usando las herramientas de ArcGis 10.4 (ESRI). El mapa de espesor del suelo se obtiene a partir del modelo matemático propuesto por (Catani, Segoni, y Falorni, 2010), donde el espesor se estima relacionando el ángulo de la pendiente ( $\delta$ ), sus valores máximos y mínimos ( $(\delta_{max})$  y  $(\delta_{min})$ ) y los valores máximos y mínimos del espesor suelo efectivo ( $z_{max}$  y  $z_{min}$ ) en el área de estudio. A continuación se describe la ecuación para determinar el espesor del suelo (Catani y cols., 2010):

$$d_{lz} = z_{max} \cdot \left[ 1 - \frac{\tan \delta - \tan \delta_{min}}{\tan \delta_{max} - \tan \delta_{min}} \cdot \left( 1 - \frac{z_{min}}{z_{max}} \right) \right] \quad (12.5)$$

Los parámetros geotécnicos e hidráulicos se obtuvieron a partir de la parametrización definidas para las zonas geotécnicas homogéneas (Tabla 73). Con respecto a los valores de  $\theta_r$ ,  $\theta_s$  y  $\alpha$  descritos en la ecuación 12.3 considerando el proceso de infiltración bajo condiciones parcialmente saturadas; se emplearon las aproximaciones mediante funciones de Pedotransferencia (PTF) con base en la textura del suelo, metodología similar a la utilizada para las estimaciones de la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ). Adicionalmente, se considera la base de datos IGBP/T para suelos tropicales reportada por Hodnett y Tomasella (2002), en la cual se presentan los valores medios y desviación estándar de  $\theta_r$ ,  $\theta_s$  y  $\alpha$  correspondientes a 11 clases de textura de suelo. En la tabla (Tabla 74) se presentan la clase de textura y valores de  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$  y  $K_s$  adoptados para la

caracterización de los materiales a partir de las zonas geotécnicas homogéneas.

Tabla 74: Parámetros hidráulicos empleados en la condición parcialmente saturada para las zonas geotécnicas homogéneas.

Zona	Textura	$\theta_r (m^3/m)$	$\theta_s (m^3/m)$	$\alpha (1/kPa)$	$K_s(m/s)$
1- Antrópico (Qll)	franco limoso	0,16	0,54	0,19	$3,40 \times 10^{-6}$
2 - PZecm-VI	limo	0,16	0,54	0,19	$1,26 \times 10^{-6}$

Entendiendo la lluvia como factor detonante, se plantean los escenarios en términos de intensidad y duración de la tormenta de diseño, evaluando los escenarios de lluvia en estado transitorio junto con el análisis del proceso de inestabilidad de forma estacional. Como insumo para la determinación de los escenarios de precipitación en el antiguo ETCR Los Monos, se emplean los datos de las estaciones pluviométricas del IDEAM y datos satelitales de CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data). Donde se obtienen los valores de intensidad y lluvia para dos escenarios asociados a un periodo de retorno (Tr) de 10 años y 100 años (Tabla 75).

Tabla 75: Intensidades de Lluvia

Intensidad (mm/h)	
Tr=10 años 1 hora	Tr=100 años 4horas
59.53	27.35

Posteriormente, con el objetivo de evaluar la incertidumbre de las variables que intervienen en el resultado de la amenaza para movimientos en masa de tipo superficial; es necesaria la incorporación de modelos de confiabilidad que permitan cuantificar la interacción de las variables e insumos para el resultado del factor de seguridad, evaluando consistentemente la estabilidad y validar los resultados obtenidos por el modelo de talud infinito (TRIGRS), en el cual los insumos fueron obtenidos mediante ensayos de laboratorio. Entre los modelos de confiabilidad más utilizados en la geotecnia, resaltan el método de Monte Carlo, FOSM y estimativas puntuales (Augusto y Hidalgo, 2011), para los objetivos requeridos, se emplea el método estadístico FOSM. A continuación, se presenta la descripción de este modelo.

### 12.5.2. Modelo FOSM (*First Order Second Moment*)

Este método se basa en el truncamiento de la función de expansión de la serie Taylor, con la cual se determina la distribución de probabilidad de una función con un número de variables aleatorias (Baecher y Christian, 2003). Las ventajas de este modelo consisten en que los cálculos son simplificados y que solo es necesario el conocimiento de los valores de los momentos de las distribuciones estadísticas de las variables que forman la función, expresados en la media y la varianza de cada variable, asumiendo una distribución normal tanto para las variables como para el Factor de Seguridad. De esta manera, para  $N$  variables aleatorias no correlacionadas  $F(x_1, x_2, \dots, x_N)$ , conservando solamente los términos del primer orden (lineales) de la serie de Taylor se producen las siguientes expresiones:

$$[FS] = F(\bar{x}_1, x_2, \dots, \bar{x}_N) \quad (12.6)$$

$$V[FS] = \sum_{i=1}^N \left( \frac{dF_s}{dx_i} \right)^2 V(x_i) \quad (12.7)$$

Donde  $\bar{x}_i$  y  $V(x_i)$  son la media y varianza de cada variable aleatoria, respectivamente. Para los valores de las derivadas usualmente se utiliza la aproximación numérica dada por Christian, Ladd, y Baecher (1994):

$$\frac{dFS}{dx_i} = \frac{F(x_i + \Delta x_i) - F(x_i)}{\Delta x_i} \quad (12.8)$$

Finalmente al utilizar este modelo, se obtiene el índice de confiabilidad del FS, calculado de la siguiente forma:

$$\beta I = \frac{E[FS] - 1}{\sigma[FS]} \quad (12.9)$$

Donde  $E[FS]$  es el valor esperado del factor de seguridad calculado con los parámetros medios de las variables independientes y  $\sigma[FS]$  es la desviación estándar del factor de seguridad obtenida por la Ecuación (12.9), teniendo como el FS crítico el valor igual a 1. Este índice expresa la confiabilidad de FS en relación con la probabilidad de falla o ruptura. Para este proyecto se evalúa el modelo FOSM a partir de las variaciones de los parámetros de resistencia (cohesión, ángulo de fricción), el peso unitario húmedo y conductividad hidráulica saturada (Tabla 76).

Tabla 76: Valores medios y porcentaje de variación para el modelo FOSM (Assis y cols., 2012)

	Variación	Media	
		Zona 1	Zona 2
Cohesión ( $Pa$ )	40 %	0	30000
Ángulo de fricción ( $\circ$ )	10 %	35	31
Peso Unitario húmedo ( $N/m^3$ )	3 %	12700	13100
Conductividad hidráulica saturada ( $m/s$ )	90 %	$3,40E - 06$	$1,26E - 06$

Los resultados de factor de seguridad del modelo TRIGRS son incorporados en el análisis de confiabilidad, descrito anteriormente, donde como resultado de la metodología FOSM se obtiene el índice de confiabilidad ( $\beta$ ). En las Figuras 169, 170, 171, 172 se presentan los resultados de índice de confiabilidad para los escenarios de lluvia especificados (Tabla 75). La clasificación de los mapas según el valor del índice de confiabilidad, se ajusta a la propuesta dada por (USCACE, 1999), la cual asigna un nivel de desempeño esperado según el índice de confiabilidad y probabilidad de falla, en el cual ( $\beta$ ) $<1.0$  se cataloga como un nivel de desempeño peligroso,  $\beta=1$  un nivel de desempeño medio y  $\beta=2,5$  un nivel de desempeño abajo del promedio, asociado a un probabilidad de falla de  $6 \cdot 10^{-3}$  de que el factor de seguridad por movimientos en masa sea menor que 1, teniendo en cuenta la incertidumbres que aporta cada parámetro (Montoya y Asis, 2011).

## 12.6. Scoops3D

El análisis de estabilidad de laderas susceptibles a movimientos en masa tipo circular se realiza de manera tridimensional (3D) mediante el *software* Scoops3D, desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Este programa evalúa la estabilidad 3D de un área representada por un modelo de elevación digital, considera la distribución espacial de las diferentes características geotécnicas y condiciones del terreno para determinar el factor de seguridad mediante métodos de equilibrio limite (Bishop simplificado u ordinario de Fellenius) considerando superficies de falla con forma esférica en un rango definido por el usuario en una red de búsqueda. En Scoops3D la zona de estudio es ingresada como una matriz, donde cada celda raster de coordenadas  $i,j$  es representada por una columna individual 3D, la cual contiene la información

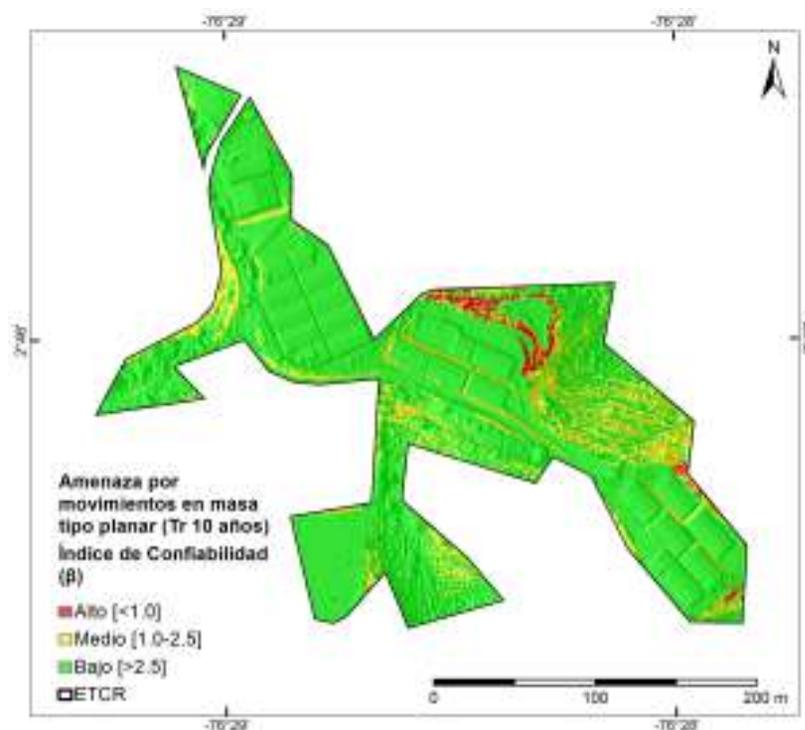


Figura 169: Amenaza por movimientos en masa tipo planar- a) Escenario  $Tr=10$  años parcialmente saturado

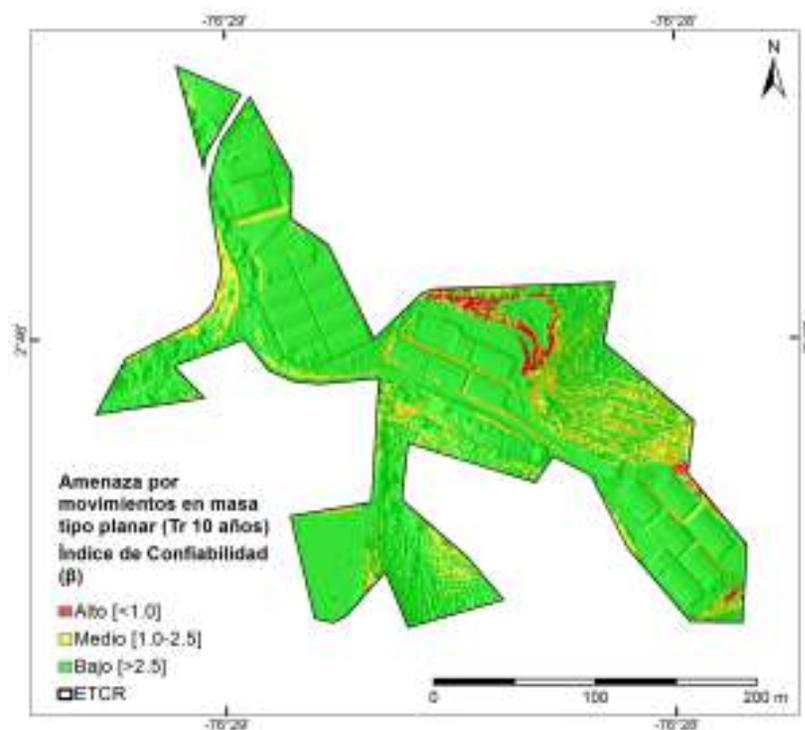


Figura 170: Amenaza por movimientos en masa tipo planar- Escenario  $Tr=10$  años saturado

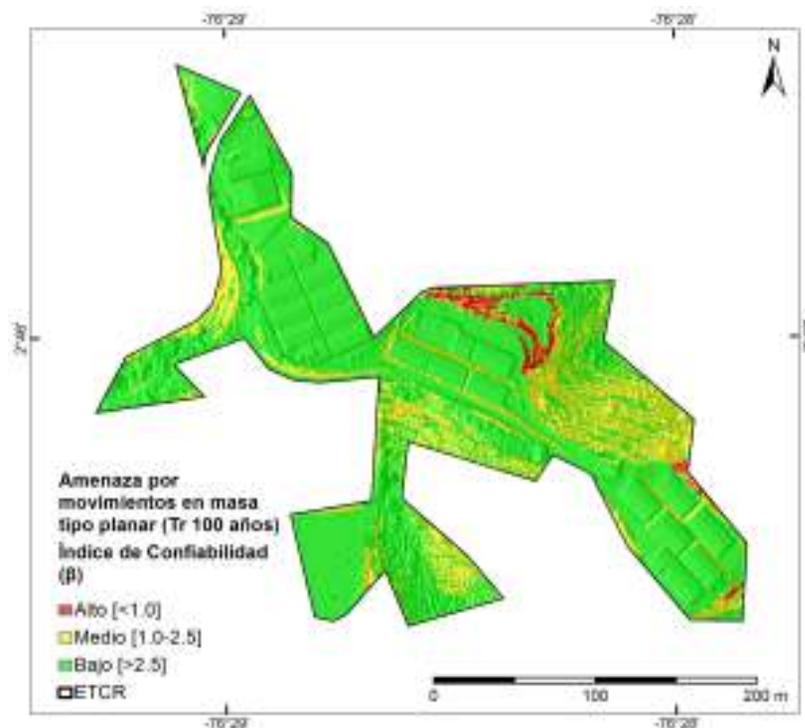


Figura 171: Amenaza por movimientos en masa tipo planar- Escenario  $Tr=100$  años parcialmente saturado

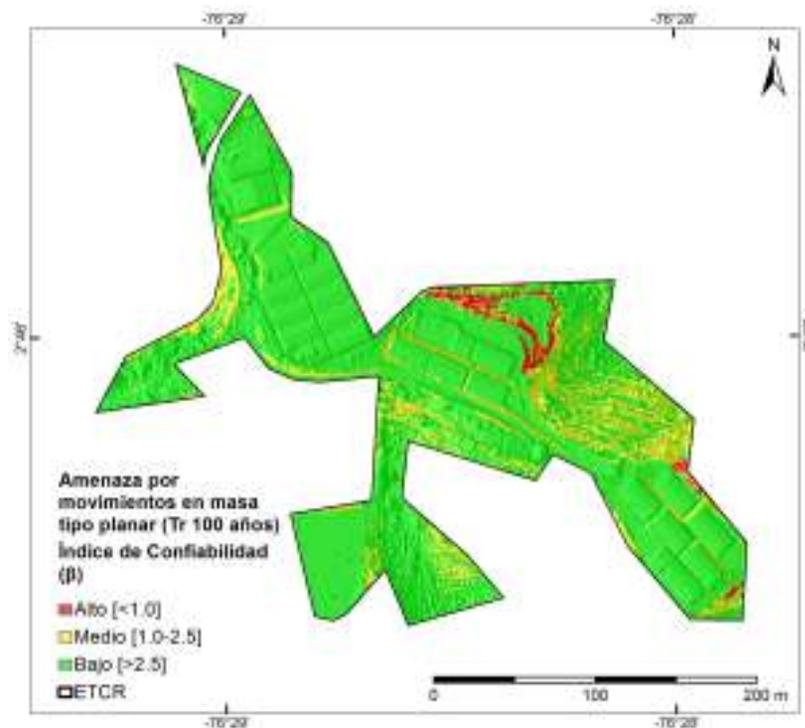


Figura 172: Amenaza por movimientos en masa tipo planar- Escenario  $Tr=100$  años saturado

de las capas del subsuelo (Figura 173).

Scoops3D permite la definición de la red de búsqueda de manera vertical y horizontal, donde cada punto representa el centro de una superficie de falla esférica a analizar como potencial deslizamiento considerando la compleja topografía. Acorde con esta red de búsqueda cada columna es atravesada por múltiples esferas, siendo el *FS* más bajo el asignado a dicha columna, la cual contiene la información de análisis (profundidad de las capas de subsuelo, parámetros geotécnicos y nivel piezométrico). La búsqueda de zonas susceptibles a deslizamientos es acotada al restringir la máxima y mínima área o volumen a deslizarse considerando como criterio los trabajos realizados en campo.

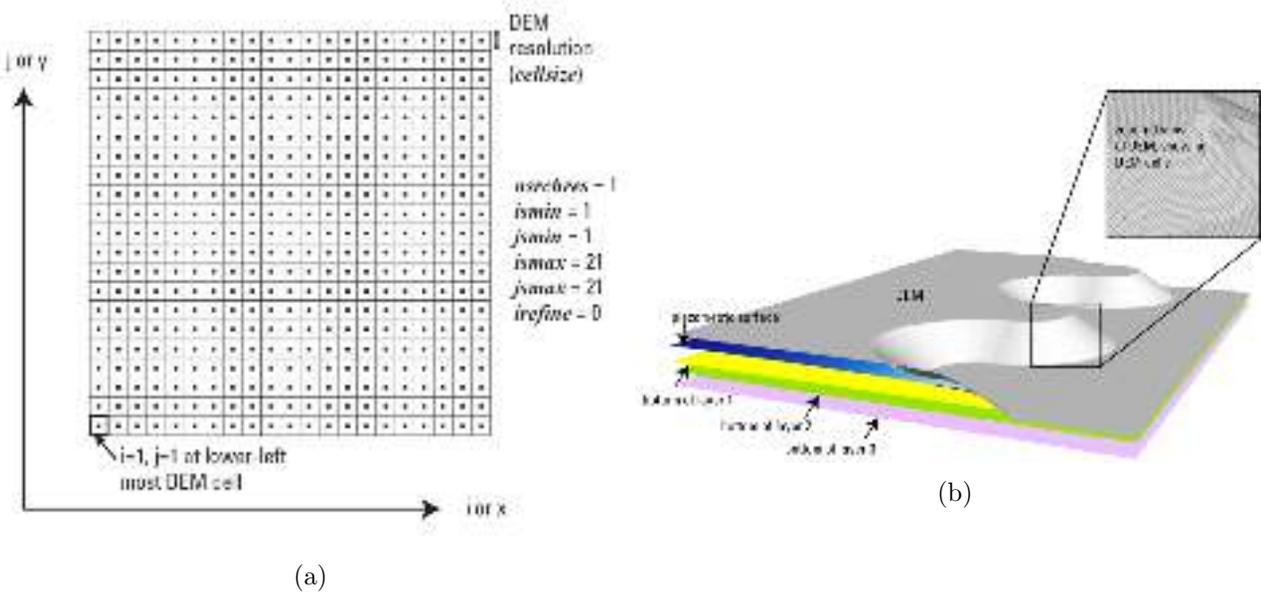


Figura 173: a) Matriz de análisis Scoops3D (Reid y cols., 2015). b) Capas de entrada

Para la implementación del modelo de estabilidad se deben ingresar diferentes parámetros básicos para representar las condiciones físicas del subsuelo (ver Tabla.77) con los cuales se construye el arreglo 3D (archivo de texto) para cada una de las columnas a analizar. Además se requiere de otros insumos como:

- Modelo de elevación digital, no solo representa la superficie del terreno, a partir de este se define la extensión de la red de búsqueda y la geometría de cada columna acorde a la resolución espacial del DEM.
- Parámetros geotécnicos de la exploración ejecutada para las zonas descritas en la subsección 12.4.2 y parámetros medios para la roca (Esquistos) de literatura (de Vallejo, 2002).

- Capas del subsuelo, a cada columna es asignada la profundidad de las capas del subsuelo en el arreglo 3D. Las cuales son determinadas acorde a la información recolectada en campo, la exploración ejecutada (Figura. 156) y el ensayo de la línea sísmica donde se evidencian cambios a materiales más competentes. La primera capa se limita a los 10m y la segunda se limita hasta los 25m, zonas con velocidades de onda hasta los 360m/s y 760m/s respectivamente.
- Superficie piezometrica, estimada haciendo uso del modelo de Catani y cols. (2010) para la distribución espacial del nivel de agua, considerando una profundidad de 10m como nivel de agua alto, se considera 10m como profundidad máxima debido a que el antiguo ETCR se encuentra ubicado en el punto más elevado de la zona y no se halló el nivel del agua en la exploración ejecutada, que alcanzó los 11m de profundidad.

Tabla 77: Parámetros geotécnicos para análisis en Scoops3D.

Zona		$c'$ (kPa)	$\phi^\circ$	$\gamma_h(kN/m^3)$
1	Antrópico (Qll)	0	35	12,7
	PZecM-V	39	36	19
	Esquisto	250	27,5	26,5
2	PZecM-VI	30	31	13,1
	PZecM-V	39	36	19
	Esquisto	250	27,5	26,5

### 12.6.1. Modelo de estabilidad - Método Bishop simplificado.

Scoops3D calcula la estabilidad de masas rígidas abarcadas por las potenciales superficies de falla esféricas,  $FS$  es calculado mediante el método de equilibrio de momentos teniendo en cuenta el concepto básico de  $FS$  como la relación entre la sumatoria de momentos actuantes y resistentes desde un centro de giro (Reid y cols., 2015).

Aunque Scoops3D permite utilizar el método ordinario de Fellenius (1936), es usado el método simplificado de Bishop (1955) con el cual los resultados son más precisos y similares a otros métodos de equilibrio limite más rigurosos (Hungry, 1987; Lam y Fredlund, 1993).

$$F = \frac{\sum R_{i,j} [c_{i,j}A_{h_{i,j}} + (W_{i,j} - Z_{pz_{i,j}}\gamma_w A_{h_{i,j}}) \tan \phi_{i,j}] / m_{\alpha_{i,j}}}{\sum W_{i,j} [R_{i,j} \sin \alpha_{i,j} + k_{eq}e_{i,j}]} \quad (12.10)$$

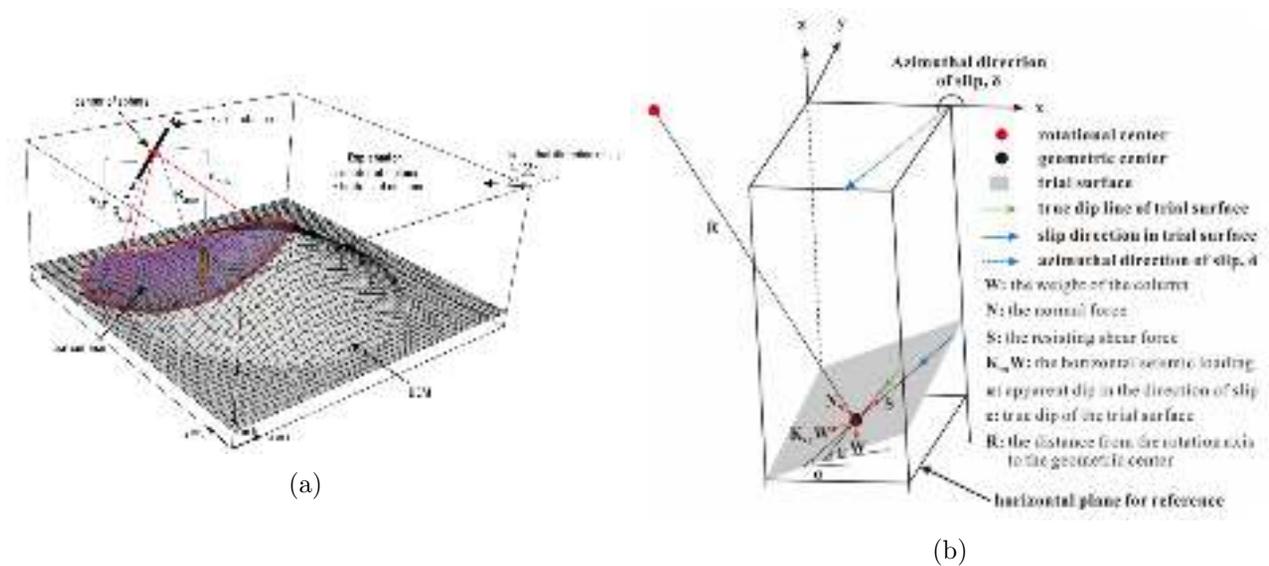


Figura 174: a) Diagrama 3D del análisis de estabilidad (Reid y cols., 2015). b) Diagrama de fuerzas sobre columna típica (Zhang y Wang, 2019)

$$m_{\alpha_{i,j}} = \cos \varepsilon_{i,j} + \frac{\sin \alpha_{i,j} \tan \phi_{i,j}}{F} \tag{12.11}$$

El Factor de seguridad (F) es el resultado de un análisis iterativo, evaluando la estabilidad mediante la sumatoria de fuerzas en cada columna de análisis (Figura 174). Donde:

- $i,j$  Localización de la celda.
- $R_{i,j}$  Distancia desde la base de la columna al eje de rotación.
- $c_{i,j}$  Cohesión del suelo.
- $A_{h_{i,j}}$  Área de la columna.
- $W_{i,j}$  Peso de la columna.
- $Z_{pz_{i,j}}$  Profundidad vertical bajo la superficie piezométrica.
- $\phi_{i,j}$  Ángulo de fricción del suelo.
- $\alpha_{i,j}$  Dirección aparente del movimiento.
- $k_{eq}$  Coeficiente horizontal pseudo-aceleración (Condición sísmica).
- $e_{i,j}$  Distancia vertical de la columna al eje de rotación.
- $\varepsilon_{i,j}$  Componente vertical de la fuerza normal.

Al definir el conjunto de centros de rotación sobre el modelo de elevación, se genera una red de búsqueda para las potenciales superficies de falla esféricas,

considerando la variación de los radios; acorde a la red de búsqueda es calculado *FS* según el arreglo 3D del área de estudio (Reid y cols., 2015).

Los resultados obtenidos son visualizados mediante *software* de información geográfica; información detallada del *software* Scoops3D es expuesta por Reid y cols. (2015).

### 12.6.2. Análisis sísmico

Para evaluar la estabilidad ante un evento sísmico, se considera una fuerza horizontal ( $k_{eq} \cdot W_{i,j}$ ) la cual actúa en el centro de la columna en la dirección azimutal del deslizamiento. La fuerza actuante resulta del producto del peso y el coeficiente de pseudo-aceleración  $k_{eq}$  (adimensional) expresado como una fracción de la gravedad. Scoops3D aplica un valor uniforme de  $k_{eq}$  en dirección horizontal alineado con el deslizamiento.

$k_{eq}$  es determinado acorde a lo expuesto en el Titulo H de la NSR-10, donde se describe el diseño y estabilidad de taludes teniendo en cuenta los efectos sísmicos mediante el análisis pseudoestático.  $k_{eq}$  es determinado en función de la aceleración máxima del terreno  $A_{max}$ , obtenida del espectro de diseño para el periodo de vibración cero (Ver Figura.175)

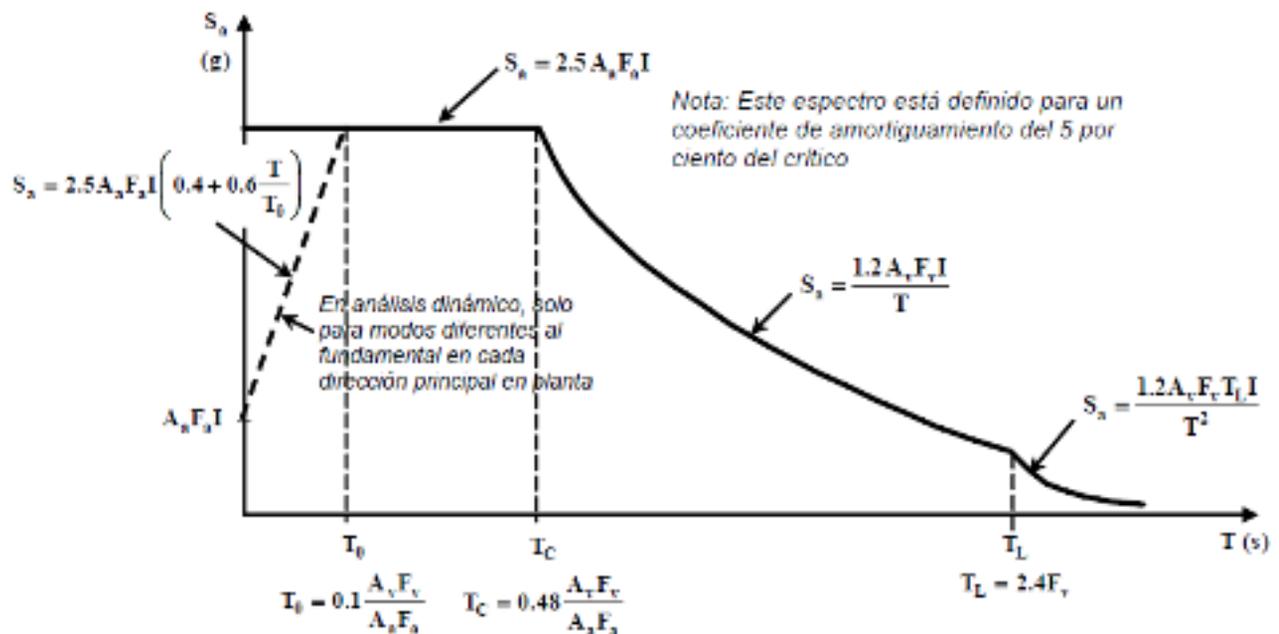


Figura 175: Espectro elástico de aceleraciones en superficie, amortiguamiento del 5% (de Ingeniería Sísmica, 2010)

$$A_{max} = A_a \cdot F_a \cdot I \tag{12.12}$$

$$A_{max} = 0,25 \cdot 1,3 \cdot 1,0 = 0,325$$

Donde:

- $A_a$  es la aceleración pico efectiva de diseño para un periodo de retorno de 475 años y un periodo de vibración de 0 segundos, para el municipio de Caldono  $A_a = 0,25$  (de Ingeniería Sísmica, 2009).
- $F_a$  es el coeficiente de amplificación, el cual es determinado teniendo en cuenta el perfil de suelo de menor  $V_s30$  en la prospección sísmica (Perfil de suelo tipo D). Se estima un coeficiente de amplificación  $F_a = 1,3$  para las condiciones obtenidas (Figura. 176).
- $I$  es el coeficiente de importancia, asumido como 1,0 para estructuras de ocupación normal como lo son las viviendas a construir (A.2.5 NSR-10).

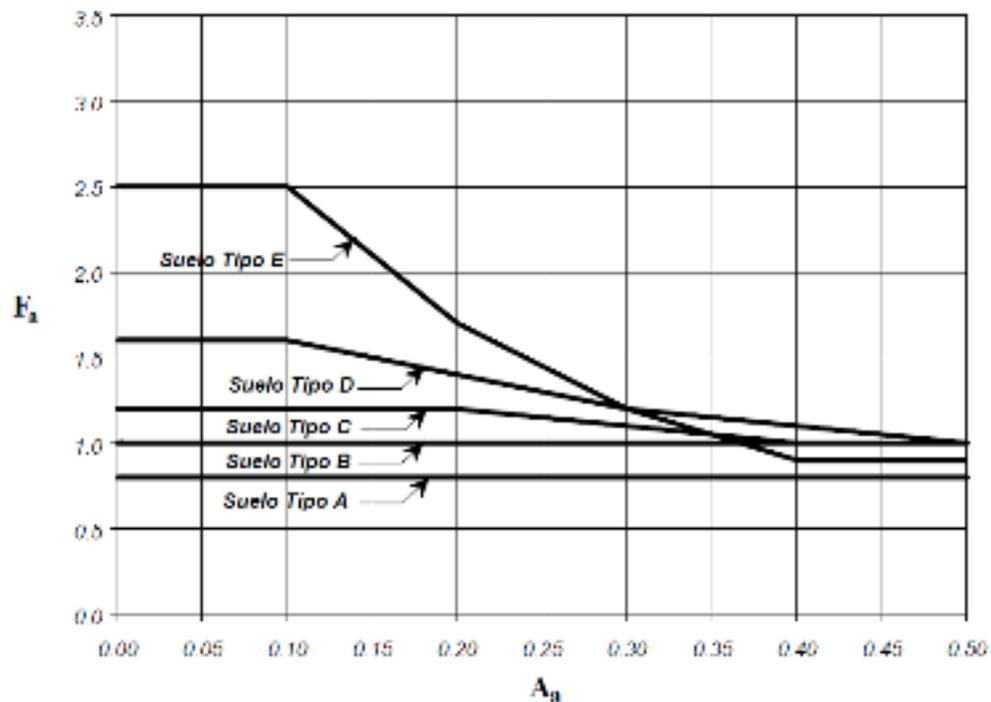


Figura 176: Coeficiente de amplificación  $F_a$  del suelos para periodos cortos del espectro (de Ingeniería Sísmica, 2010)

Posteriormente, se obtiene el  $k_{eq}$  teniendo en cuenta los criterios para el análisis pseudoestático dados en la tabla de la NSR-10 (H.5.2.5). Para este estudio se adopta el valor 0,8 que representa “Suelos, enrocados y macizos rocosos muy fracturados ( $RQD < 50\%$ )”.

$$K_{ST} = K_{eq} = 0,80 \cdot A_{max} \tag{12.13}$$

$$K_{ST} = K_{eq} = 0,80 \cdot 0,325 = 0,26$$

Se obtiene un valor para el coeficiente pseudoestático  $K_{eq} = 0,26$  el cual es usado para el análisis sísmico en Scoops3D para la fuerza horizontal ( $k_{eq} \cdot W_{i,j} = 0,26 \cdot W_{i,j}$ ).

### 12.6.3. Resultados.

En las Figuras 177, 178, 179, 180 se presentan los resultados para 4 escenarios evaluados en Scoops3D; en dos de ellos se considera la fuerza sísmica. Escenario 1: estado seco, Escenario 2: estado seco con análisis sísmico, Escenario 3: nivel de agua alto (10m), Escenario 4: nivel agua alto con análisis sísmico.

Tabla 78: Porcentaje de área de  $FS$  por escenario evaluado

$FS$	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
0 – 1	0,4 %	5,6 %	0,4 %	6,4 %
1 – 1,5	3,9 %	37,8 %	3,9 %	75,4 %
> 1,5	95,7 %	56,6 %	95,7 %	18,2 %

En el escenario 1 no actúan fuerzas externas y el terreno se encuentra en estado seco, se presenta un 0,4 % del área total con  $FS < 1$  y 3,9 % con  $FS$  entre 1 y 1,5 en el área central de la unidad del depósito antrópico. Al aplicar una fuerza sísmica con  $k_{eq} = 0,26$  en estado seco (escenario 2) las zonas con  $FS < 1$  aumentan en un 25,2 % en la zona de depósitos antrópicos y las zonas con  $FS$  entre 1 y 1,5 aumentan al Este hasta un 37,8 %.

Cuando se realiza el análisis con un nivel de agua alto sin fuerzas externas, el resultado es igual al escenario 1. Finalmente, en el escenario 4 se presenta la condición más desfavorable en la que se evalúa la amenaza durante un evento sísmico con un nivel de agua alto, el área con  $FS < 1$  alcanza un 6,4 % principalmente en los depósitos antrópicos y 18,2 % posee  $FS > 1,5$ , la mayoría del área se encuentra con  $FS$  entre 1 y 1,5 (75,4 %).

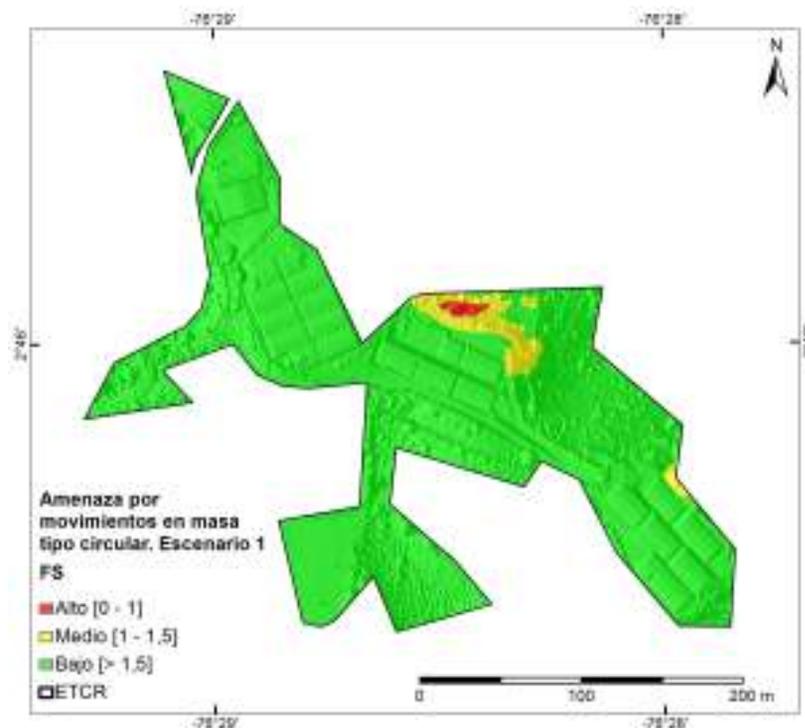


Figura 177: Amenaza por movimientos en masa tipo circular a) Escenario 1 estado seco

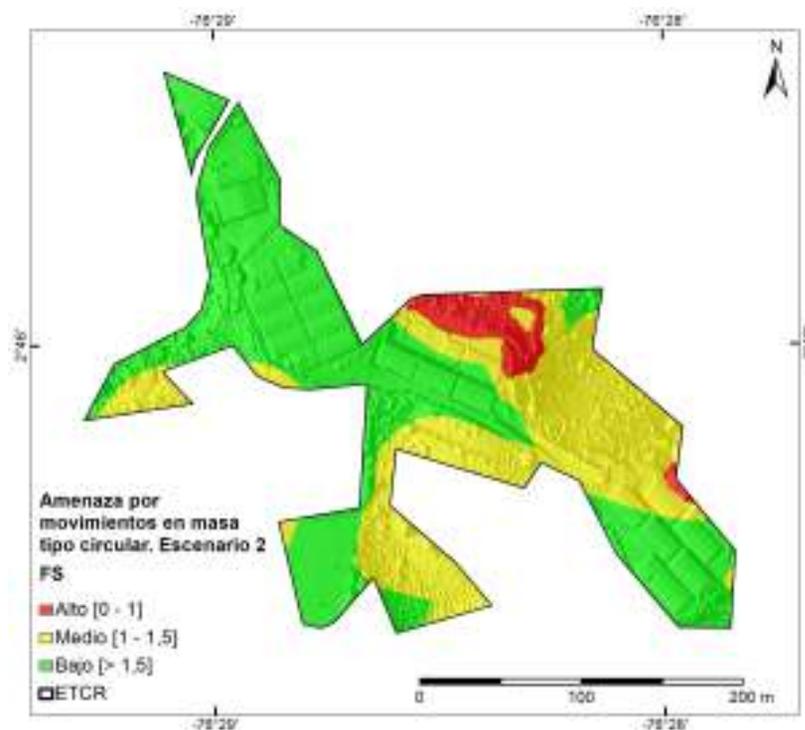


Figura 178: Amenaza por movimientos en masa tipo circular b) Escenario 2 estado seco y fuerza sísmica

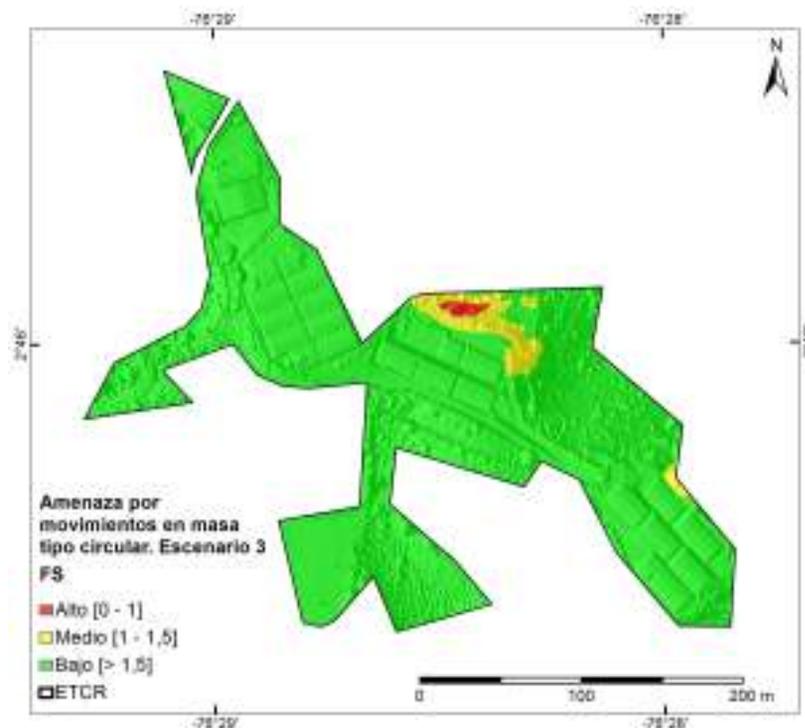


Figura 179: Amenaza por movimientos en masa tipo circular c) Escenario 3 nivel de agua alto

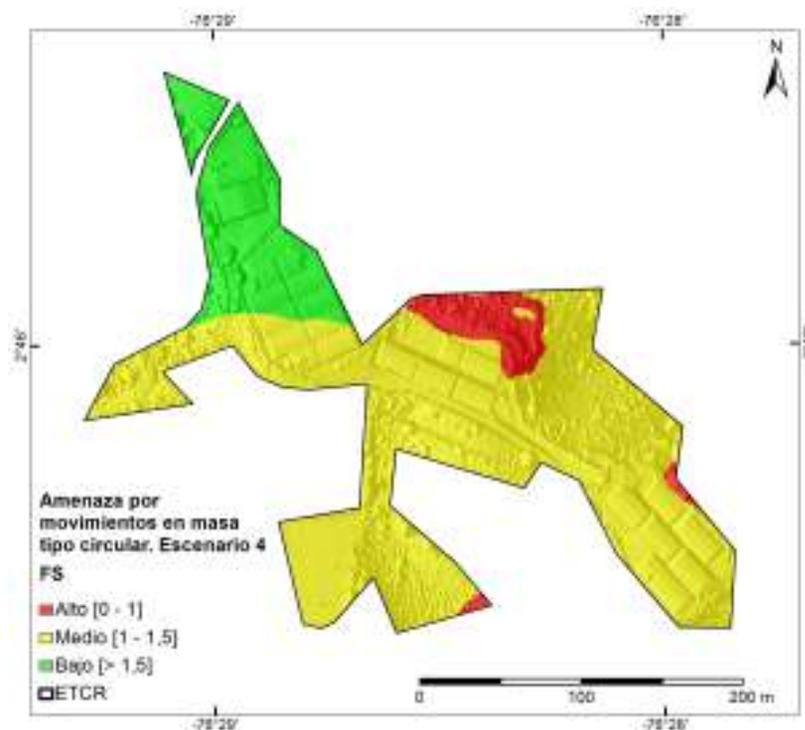


Figura 180: Amenaza por movimientos en masa tipo circular d) Escenario 4 nivel de agua alto y fuerza sísmica

## 12.7. Mapa de amenaza por movimiento en masa

Debido a que se utilizan diferentes escenarios para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa, es necesario combinar dichos escenarios para obtener el mapa por movimientos en masa definitivo de la zona de estudio. A continuación se describe el procedimiento utilizado:

- Cruzar los mapas de los diferentes escenarios de amenaza por movimientos en masa tipo planear (TRIGRS) conservando para cada celda la categoría de amenaza mayor (ver Figura 181)

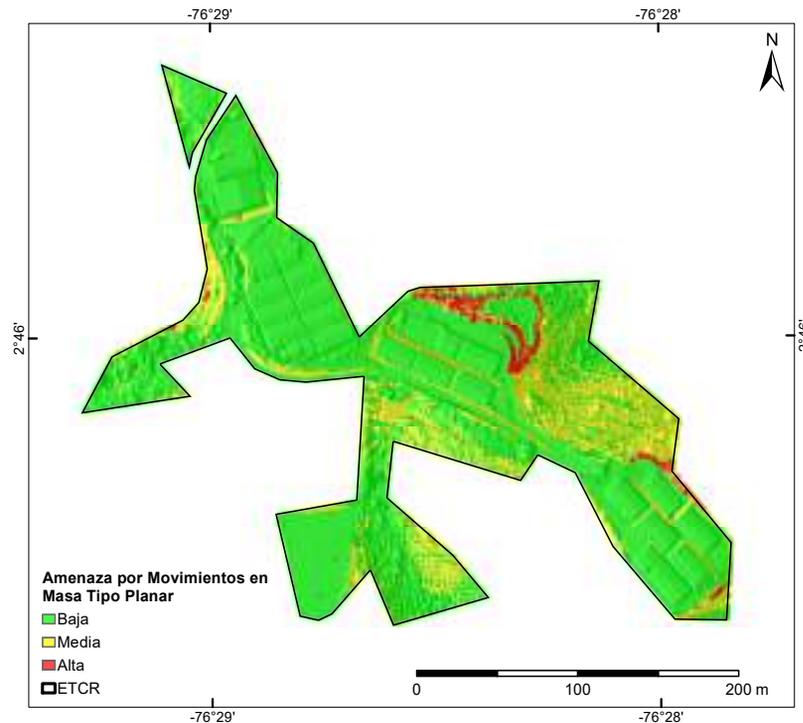


Figura 181: Amenaza por movimientos en masa tipo planear

- Cruzar los mapas de los diferentes escenarios de amenaza por movimientos en masa tipo circular (Scoops3D) conservando para cada celda la categoría de amenaza mayor como criterio conservador (ver Figura 182). Para el escenario evaluado con sismo como factor detonante y el nivel freático superior, se modificó la amenaza alta a amenaza media y la amenaza media a baja, considerando que dicho escenario representa un escenario extremo con baja probabilidad de ocurrencia.
- Teniendo en cuenta las recomendaciones del Decreto 1807 del 2014, el cual indica que se debe realizar un proceso final de depuración, incorporando

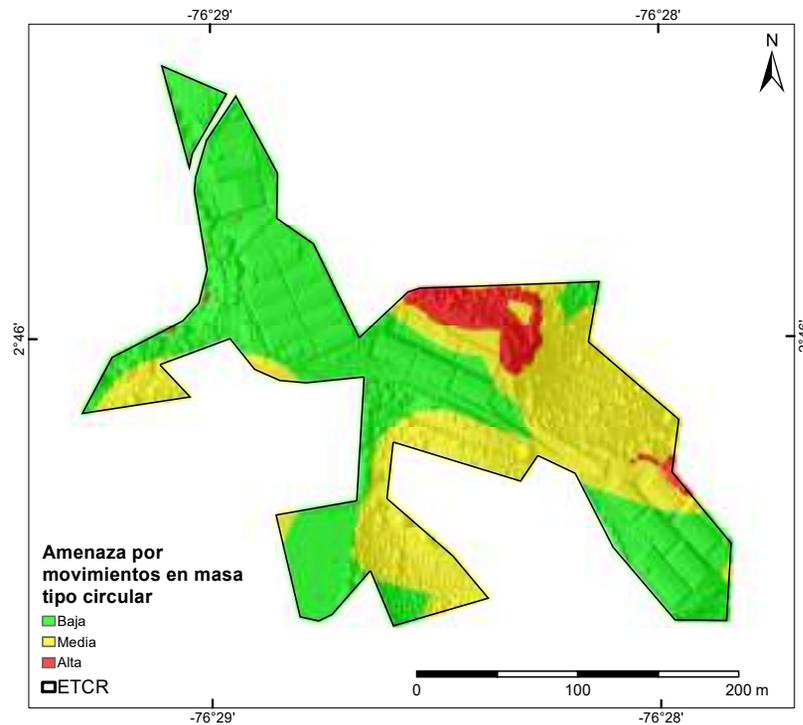


Figura 182: Amenaza por movimientos en masa tipo circular

como amenaza alta las áreas con presencia de procesos morfodinámicos activos, se llevo a cabo un trabajo de campo y las áreas identificadas en el mapa de procesos morfodinámicos se incorporaron en el mapa de amenaza final(ver Figura 183).

- Finalmente, se cruza el resultado final del modelo TRIGRS, Scoops3D y el ajuste heurístico al cual se le aplicara la corrección por unidad mínima cartográfica que da como resultado la Figura 184

En La Tabla 79 se presenta el porcentaje general de cada categoría de amenaza.

Tabla 79: Porcentaje de mapa de amenaza por movimientos en masa

<i>Categoría</i>	<i>%</i>
Baja	43,3
Media	45,6
Alta	6,1

Se resalta que los porcentajes de amenaza alta están asociados a la baja resistencia que presentan los materiales (Lleno Antrópico Qll) bajo condiciones

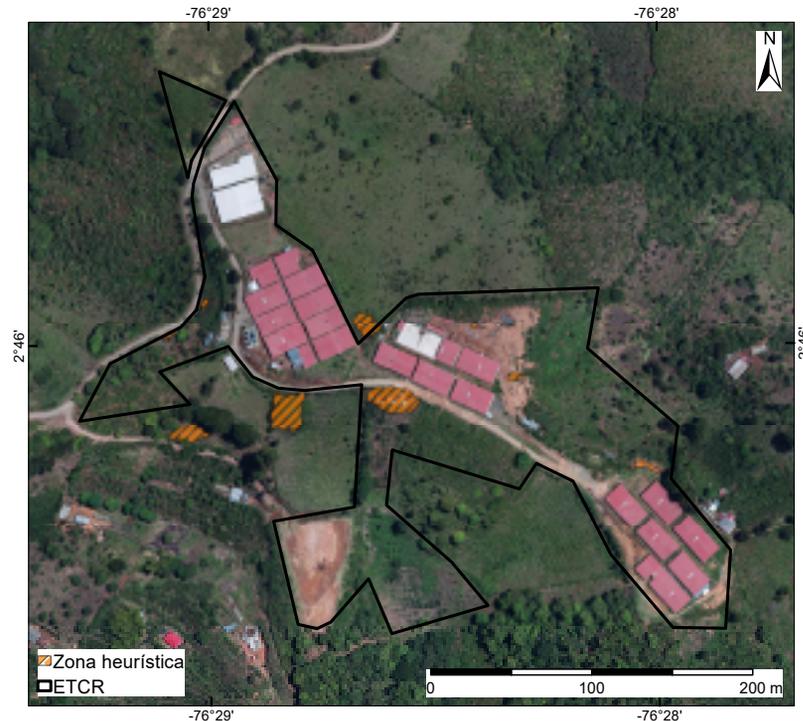


Figura 183: Ajuste heurístico

extremas y a los cortes en la zona de la vía donde hay evidencia de procesos activos (ver Figura 153). Los valores de amenaza media están asociados a las zonas de mayor pendiente del predio, mientras que las zonas de menor pendiente representan los valores de categoría baja.

## 12.8. Análisis de estabilidad para sectores críticos

A partir de los resultados arrojados por los modelos de TRIGRS y Scoops3D, y la incorporación de los puntos de control determinados en las visitas hechas en el territorio se determinaron zonas críticas a las cuales se les realizaron los perfiles correspondientes para ser analizados por medio del software Slide de Rocscience ®, el cual analiza la ladera bidimensionalmente por métodos de estabilidad de equilibrio limite disponibles (Janbu, Fellenius, Bishop etc.). Teniendo en cuenta que los perfiles se ubicaron en zonas estratégicas donde se tuviera una interacción o influencia directa con los asentamientos humanos previstos para el antiguo ETCR Los Monos.

Para lograr el análisis, en primer lugar se trazaron unidades de ladera (*slope units*), con el fin de diferenciar las laderas o taludes de análisis. Dichas unidades se definen mediante la interpretación del mapa de aspectos y el mapa de

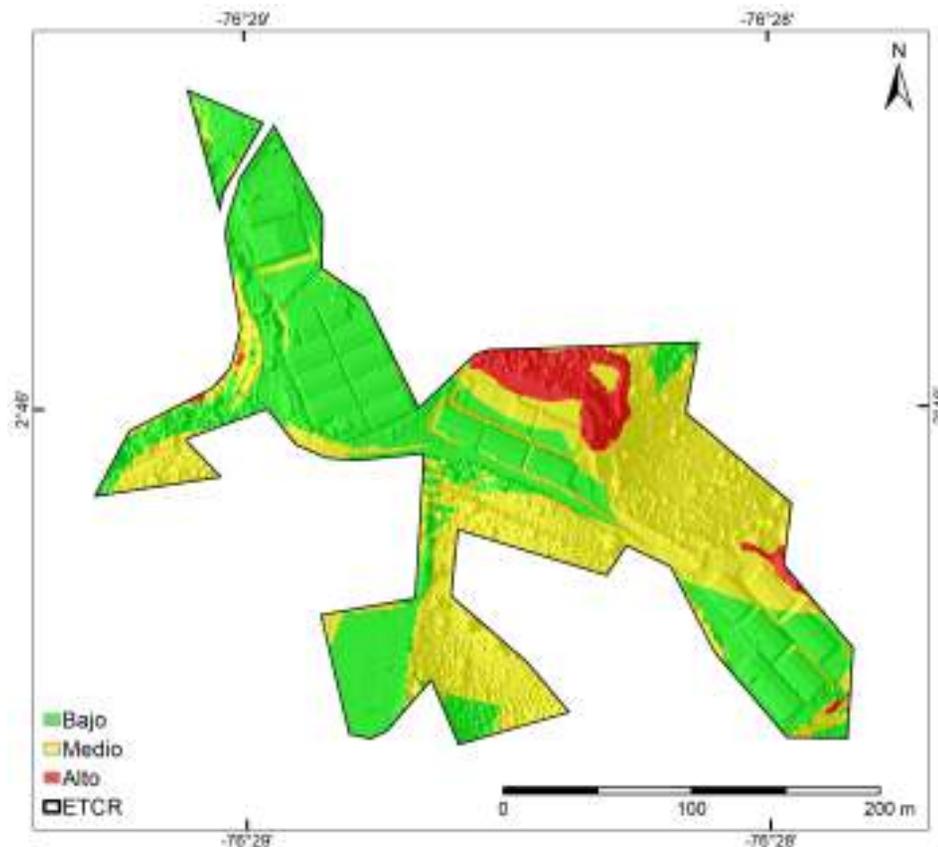


Figura 184: Amenaza estudio detalle para movimientos en masa

pendientes. Las unidades de ladera construidas y los cortes sobre las zonas de interés se presentan en la Figura 185.

Para definir los cortes que fueron tenidos en cuenta para el desarrollo general del análisis de estabilidad se generaron perfiles topográficos por medio de Arc-Map y con la ayuda del programa de diseño AutoCAD, teniendo en cuenta las características de forma del terreno y los cambios de pendiente existentes a lo largo del corte correspondiente. Posteriormente, para el análisis de estabilidad en cada unidad de ladera de interés se evaluaron cuatro escenarios diferenciados por el tipo de falla (circular o no circular) en condiciones estáticas (sin influencia de un sismo) y condiciones pseudoestáticas (con influencia de un sismo).

Para cada escenario se ejecutó un análisis probabilístico utilizando como parámetro variable el nivel freático con una distribución normal. Lo que permite al software analizar la influencia de las variaciones del nivel freático. Por otro lado, se ingresaron los datos estadísticos correspondientes a los parámetros geotécnicos de los materiales encontrados en las perforaciones, teniendo en cuenta la media, y un coeficiente de variación de 40 %, 10 % y 3 % para los

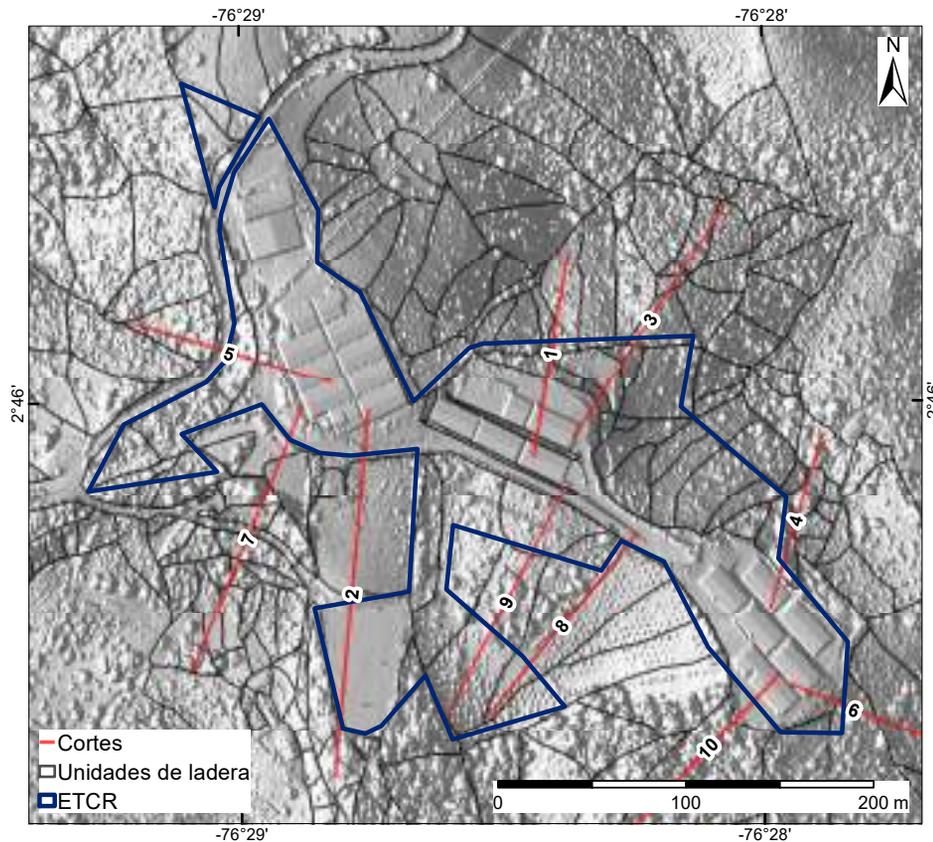


Figura 185: Mapa de las unidades de ladera y los cortes realizados para el antiguo ETCR Los Monos

parámetros de cohesión, ángulo de fricción y peso unitario respectivamente, y extremos relativos calculados con variaciones de dos desviaciones estándar para cada parámetro.

A continuación se muestran los resultados arrojados por el software Slide con los diferentes métodos estadísticos, escenarios analizados y sus respectivas interpretaciones para cada corte, además de las recomendaciones en caso de que se requieran obras de remediación.

**12.8.1. Análisis de estabilidad para el corte C1**

A partir del corte C1 se construyó el perfil correspondiente, el cual alcanza una longitud aproximada de 110m, buscando analizar la zona previamente definida como objeto de estudio, en la cual se tuvo en cuenta la información obtenida de la perforación 3, ubicada muy próxima a la zona superior del corte, lo cual es adecuado para la proximidad a la realidad de los parámetros de las muestras, además se utilizó la misma información a profundidad que en el software Scoops3D para esta zona. La perforación 3 alcanzó un registro a 3,5m

de profundidad indicando la presencia de suelo residual. De esta perforación se sacaron 3 muestras a diferentes profundidades de las cuales se pudo conocer que el suelo residual tiene 71,8 % de finos y 28,2 % de arenas.

A partir de lo anterior se realiza una interpretación con la información que se tiene de los parámetros del suelo, por tal motivo se dice que toda la ladera esta constituida por una capa inicial de lleno antrópico, seguida de saprolito y finalmente esquisto.

Este corte fue trazado debido a los resultados arrojados por los software Scoops3D y TRIGRS donde se muestra amenaza alta en esta zona. Los resultados que arroja Slide, los cuales se observan en la Tabla 80, muestran un factor de seguridad mínimo de 0,47, para los escenarios pseudoestáticos y factor de seguridad mínimo de 1,03 con probabilidad de falla de 41,8 % para los escenarios estáticos, lo que indica una ladera inestable para ambos escenarios, pues ningún factor de seguridad alcanza el valor adecuado.

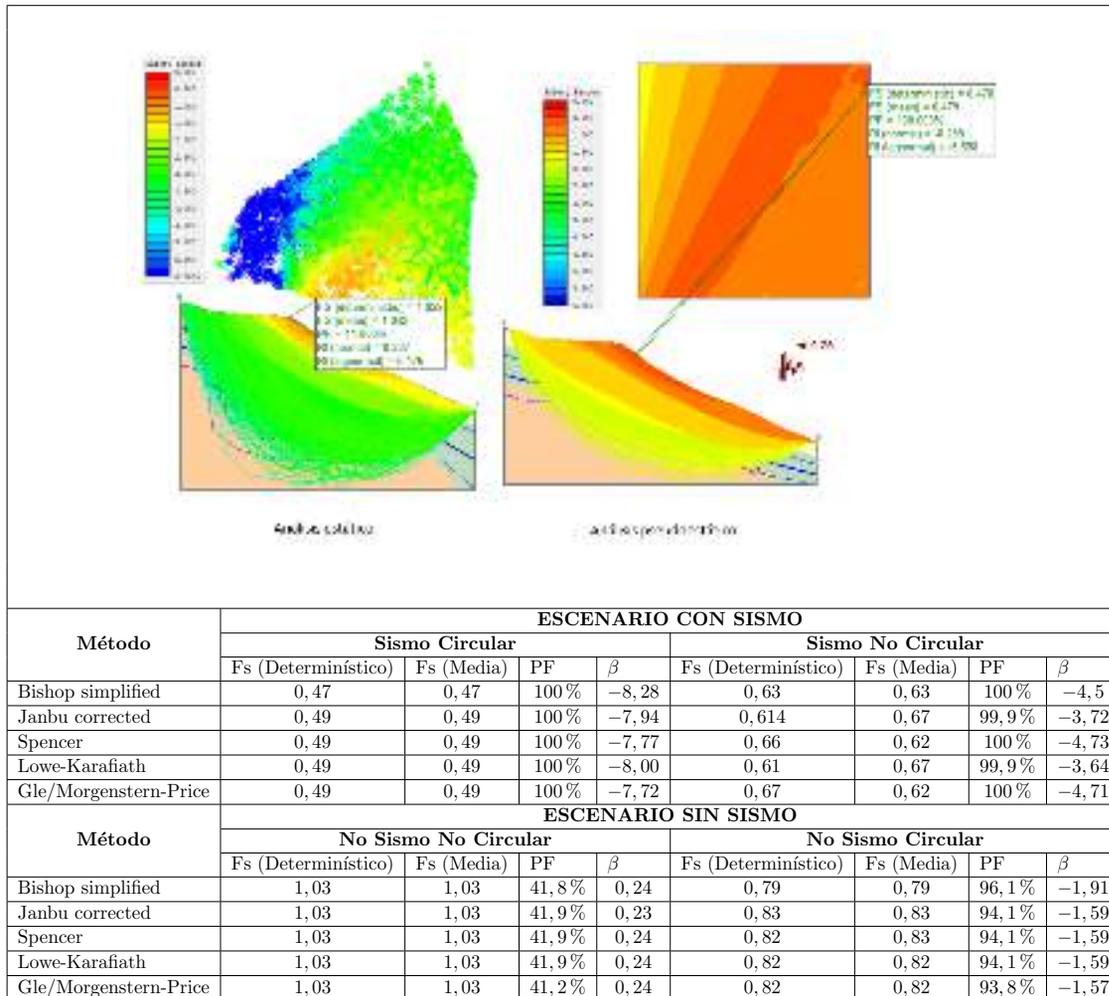
Debido a lo anterior, se entiende que hay que intervenir la ladera, por tal motivo se realizan ciertas consideraciones con respecto a la interacción con el nivel freático y el tipo de material. Los resultados arrojados por Slide (ver Figura 186) indican que es el lleno antrópico el que hace fallar la ladera. Finalmente para este caso puntual se recomienda remover la mayor cantidad de lleno antrópico o realizar terrazas que cuenten con un diseño previo, además al hacer esto también se logra disminuir el grado de la pendiente, lo que a su vez es conveniente para la estabilidad del talud.

### **12.8.2. Análisis de estabilidad para el corte C2**

El corte 2 se realizó debido a la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), además de los resultados de los software Scoops3D y TRIGRS donde se indica zona de amenaza media. El corte 2 alcanza una longitud de 191m, el cual abarca: la zona de la primera ladera, la zona plana que corresponde a la cancha (donde se planea construir la planta de tratamiento de aguas residuales) y el tramo final (perteneciente a la segunda pendiente). Para la realización del perfil del corte 2 se tuvo en cuenta la perforación 7, el apique 6, y los PTAR 1,2 y 3, además de la información utilizada en el software Scoops3D; a partir de estos se logró determinar la presencia de suelo residual, saprolito y esquisto.

A partir de lo anterior se realiza una interpretación con la información que se tiene de los parámetros del suelo, por tal motivo se dice que toda la ladera

Tabla 80: Resultados de Slide para C1 y escenario más crítico



esta constituida por una capa inicial de suelo residual, seguida de saprolito y finalmente esquisto.

La Tabla 81 presenta los resultados arrojados por el software Slide de los métodos estadísticos empleados para cada uno de los escenarios propuestos (estático y pseudoestático) en el análisis del perfil 2, en la cual se observa para el escenario pseudoestático factor de seguridad adecuado, debido a que este es mayor a 1,73 y la probabilidad de falla es 0 %. Para los siguientes escenarios en condiciones estáticas, se observan factores de seguridad mayores a 3,06 % y la probabilidad de falla es 0 %.

A modo de conclusión para los diferentes escenarios y sus respuestas en cuanto a los métodos estadísticos utilizados en Slide se evidencia factores de seguridad muy superiores a 1,7, lo que indica estabilidad en el talud, por tal motivo no se realizan consideraciones o recomendaciones.

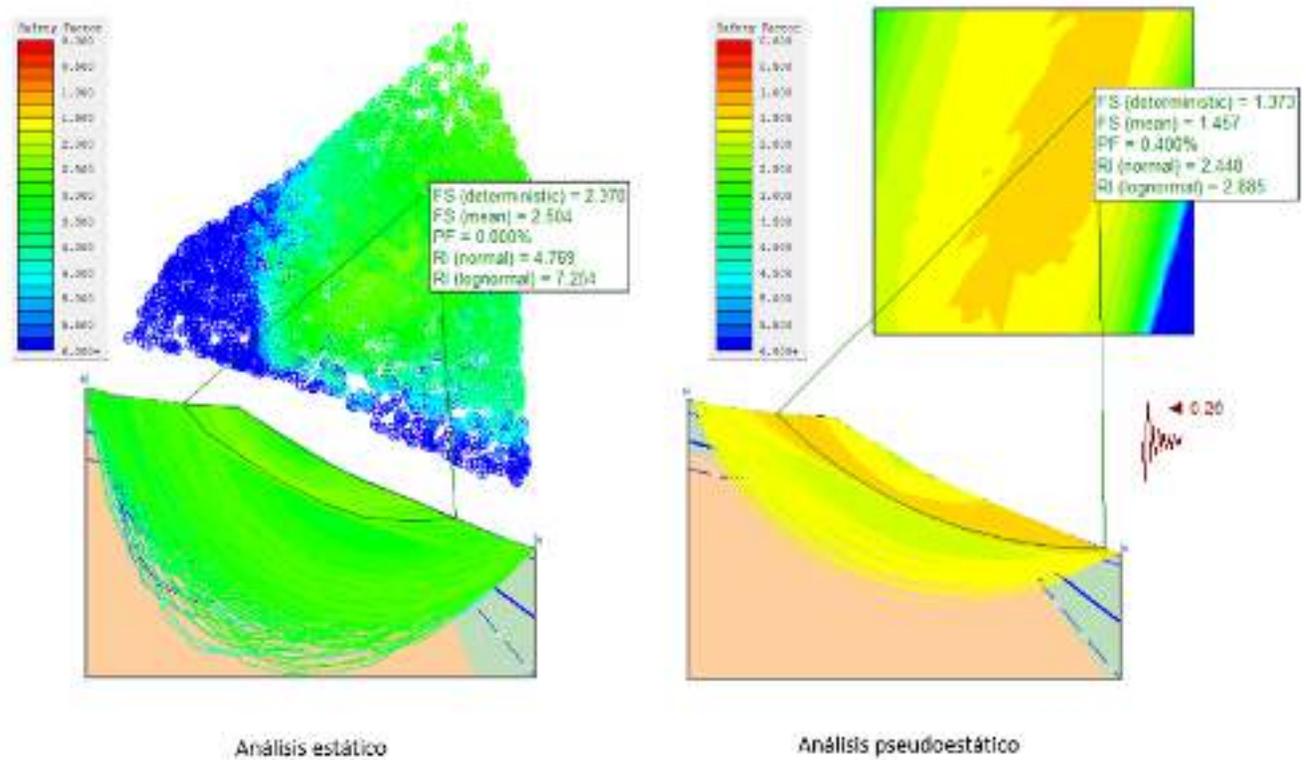


Figura 186: Perfil del corte C1 para escenarios más críticos con remoción del lleno antrópico

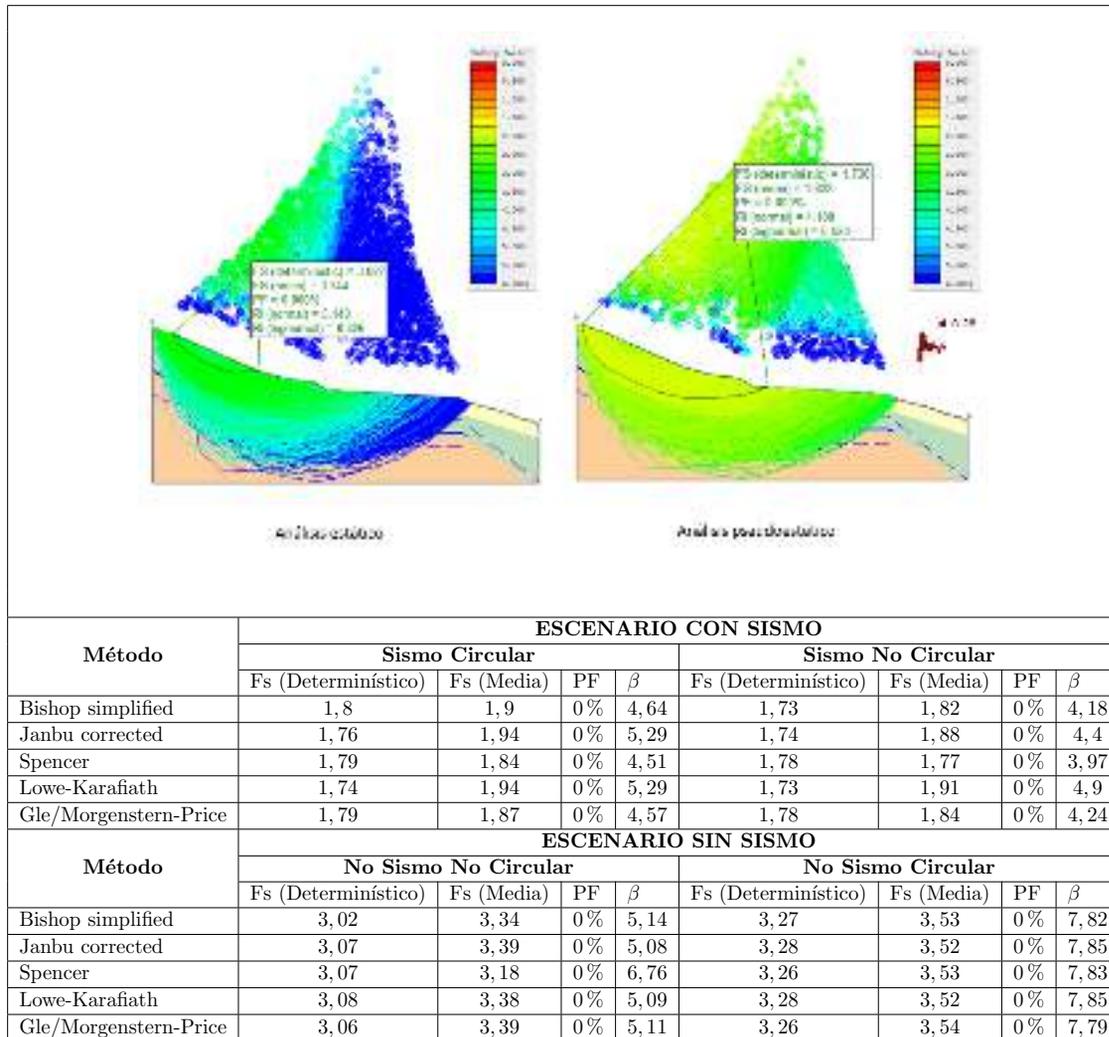
### 12.8.3. Análisis de estabilidad para el corte C3

A partir del corte C1 se construyó el perfil correspondiente, el cual alcanza una longitud aproximada de 149m, buscando analizar la zona previamente definida como objeto de estudio, en la cual se tuvo en cuenta las perforaciones 2 y 3, ubicada muy próxima a la zona superior del corte, lo cual es adecuado para la proximidad a la realidad de los parámetros de las muestras, además de la información utilizada en el software Scoops3D. La perforación 3 alcanzó un registro a 3,5m, de esta se sacaron 3 muestras a diferentes profundidades de las cuales se pudo conocer que el material esta conformado por 71,8% de finos y 28,2% de arenas; por otro lado de la perforación 2 se tomaron 15 muestras de las cuales se pudo conocer que el material está conformado por 76,4% de finos, 20,2% de arenas y 3,4% de gravas.

A partir de lo anterior se realiza una interpretación con la información que se tiene de los parámetros del suelo, por tal motivo se dice que toda la ladera esta constituida por una capa inicial de lleno antrópico, seguida de saprolito y finalmente esquisto.

Este corte fue trazado debido a los resultados arrojados por los software

Tabla 81: Resultados de Slide para C2 y escenario más crítico

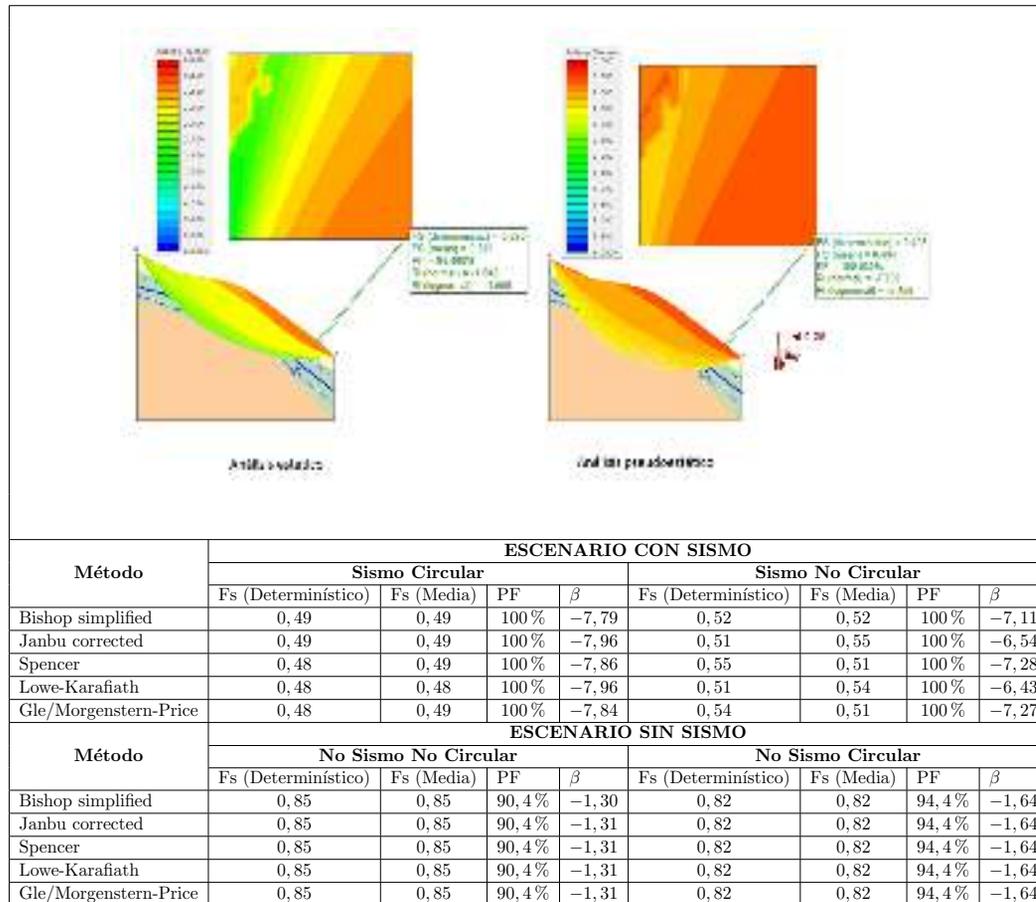


Scoops3D y TRIGRS donde se muestra amenaza alta en esta zona. Los resultados que arroja Slide, los cuales se observan en la Tabla 82, muestran un factor de seguridad mínimo de 0,48, para los escenarios pseudoestáticos y factor de seguridad mínimo de 1,03 con probabilidad de falla de 0,82% para los escenarios estáticos, lo que indica una ladera inestable para ambos escenarios, pues ningún factor de seguridad alcanza el valor adecuado.

Debido a lo anterior, se entiende que hay que intervenir la ladera, por tal motivo se realizan ciertas consideraciones con respecto a la interacción con el nivel freático y el tipo de material. Los resultados arrojados por Slide (ver Figura 187) indican que el lleno antrópico y el nivel freático desestabilizan la ladera. Para este caso puntual se recomienda remover la mayor cantidad de lleno antrópico o realizar terrazas que cuenten con un diseño previo, e implementar

drenes de 20m de longitud, en la parte inferior de la ladera, para disminuir el nivel freático aproximadamente 3m de profundidad. Finalmente con estas recomendaciones se logra estabilizar la ladera, según los resultados arrojados por Slide.

Tabla 82: Resultados de Slide para C3 y escenario más crítico



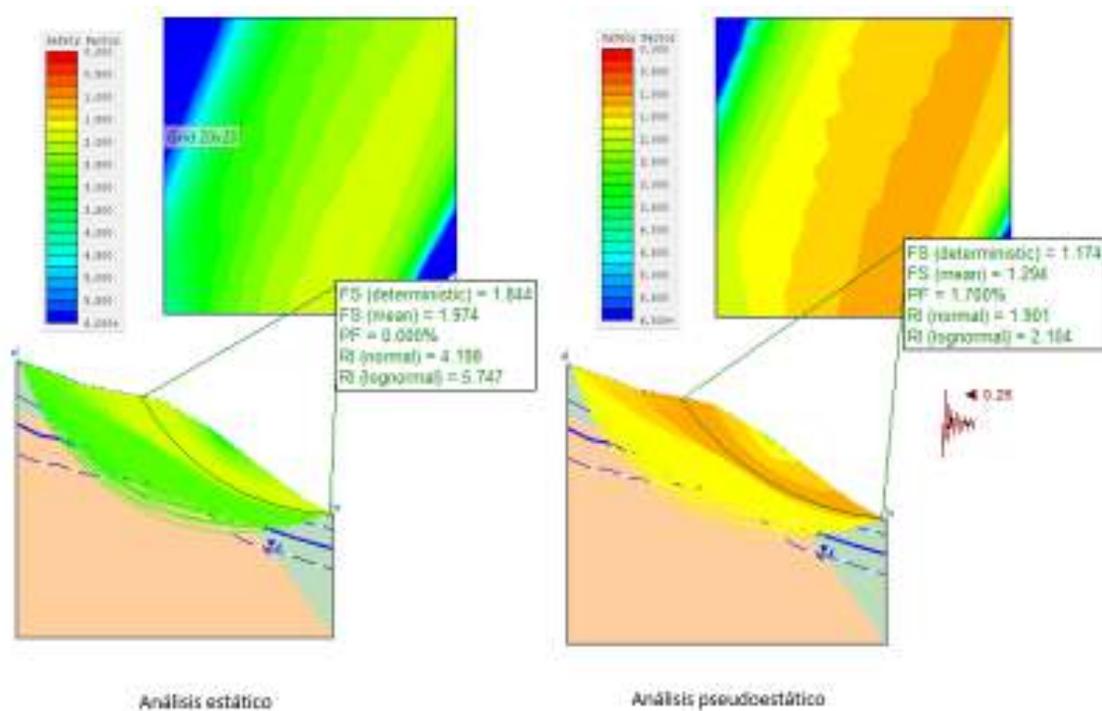


Figura 187: Perfil del corte C3 para escenarios más críticos con remoción del lleno antrópico y cambio en la profundidad del nivel freático

#### 12.8.4. Análisis de estabilidad para el corte C4

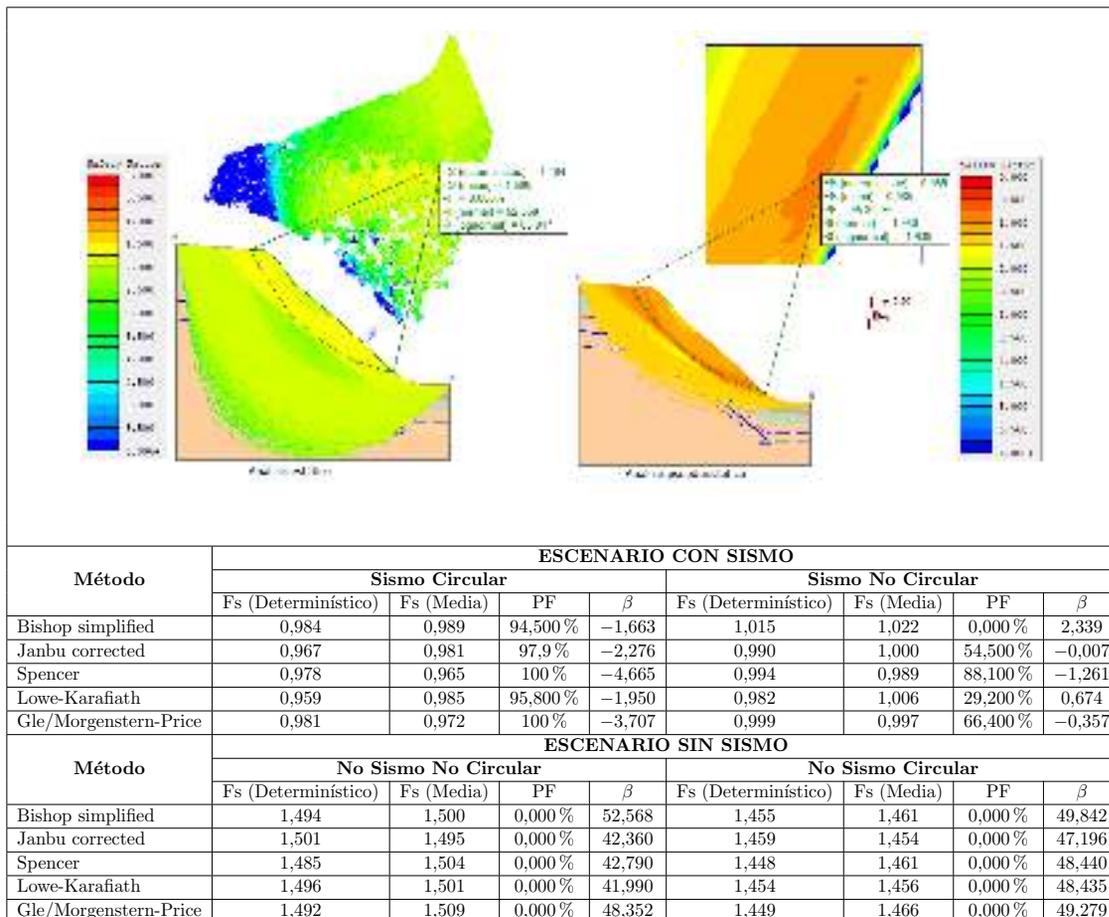
Para el análisis de la zona representada por medio del perfil construido a través del corte C4, se tomaron los parámetros geotécnicos obtenidos por la perforación P4, siendo esta la más cercana al corte, ubicada a 7m al este del punto más alto del perfil correspondiente. Para dicha perforación se tiene, bajo una capa delgada de materia orgánica, un horizonte de suelo residual con textura arcillosa, con alta consistencia, adicionalmente se destaca que el material se encuentra totalmente meteorizado y no conserva estructura alguna de la roca fresca. Tomando en cuenta los resultados obtenidos por los ensayos de laboratorio correspondientes para la única muestra extraída, se incluyen los parámetros geotécnicos en el software Slide, como parte del primer horizonte de suelo, hasta los 3,5m de profundidad registrados en la perforación y materiales analizados. Para los siguientes horizontes de suelo se tomaron los datos de la parametrización geotécnica, realizada a partir de la geología superficial y aplicada para el modelo Scoops3D, de donde se utilizaron los parámetros registrados para los horizontes de suelo de la zona 2, en la cual se ubica el corte espacialmente.

La inclusión de este corte y de la zona de interés representada en el perfil, se

da por la presencia de un polígono con amenaza alta según los resultados tanto de Scoops3D como de TRIGRS, adicional a que esta misma zona fue identificada en campo como una zona de interés según la interpretación heurística realizada en la visita al antiguo ETCR Los Monos.

Los resultados obtenidos por el software Slide para los distintos métodos y escenarios estudiados, permiten entender la zona analizada como de amenaza alta, ya que para escenarios en condiciones pseudoestáticas se obtienen en su mayoría,  $FS$  por debajo de 1, asociados a  $PF$  de hasta el 100 % con el análisis con tipo de falla circular, adicionalmente los  $FS$  resultantes para escenarios estáticos son levemente inferiores a 1,5. En general las condiciones estáticas reducen considerablemente el valor de la  $PF$ , pero los factores de seguridad continúan indicando probabilidad de falla (ver Tabla 83).

Tabla 83: Resultados para C4 y escenario más crítico con sismo y sin sismo.



Finalmente, partiendo de la existencia del polígono con amenaza alta sobre el perfil y la obtención de factores de seguridad bajos, se debe interpretar la sección estudiada como una zona con alta probabilidad de falla, la cual debe

ser intervenida para evitar el futuro desprendimiento del terreno. A partir del software Slide, se realizaron variaciones en el nivel freático, con el objetivo de analizar si la instalación de sistemas de filtros o drenajes, que permitan profundizar el nivel freático, sería una obra de remediación suficiente para estabilizar la zona, de igual forma, se estudió la posibilidad de realizar un terraceo en el talud. Los resultados indican que disminuir la altitud del nivel freático no es medida suficiente para obtener  $FS$  mayores a 1,05 para escenarios pseudo-estáticos y reducir las probabilidades de falla, mientras que la construcción de terrazas resulta ser muy efectiva, logrando obtener  $FS$  mayores a 1,07 y  $PF$  del 0%, tal como se observa en la Figura 188. Por lo anterior, se recomienda como obra de remediación, la construcción de terrazas en la zona, buscando reducir las probabilidades de falla y considerar el terreno estable según los resultados arrojados por el software Slide.

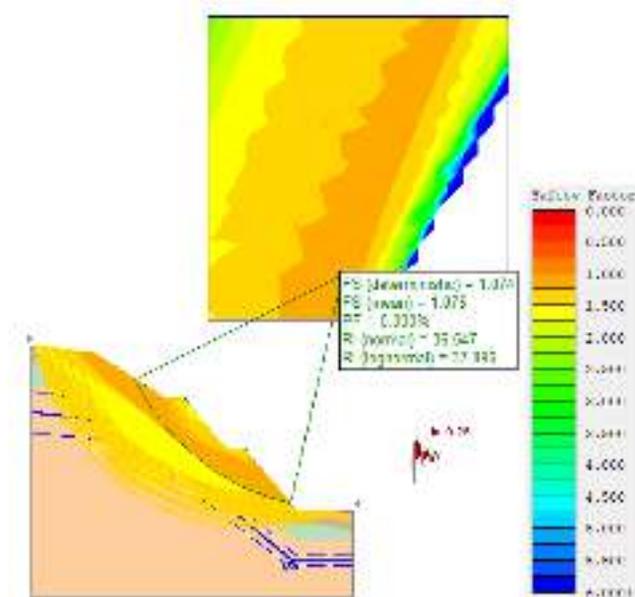


Figura 188: Perfil del corte C4 en escenario más crítico (sismo circular) con terraceo.

### 12.8.5. Análisis de estabilidad para el corte C5

Por medio del corte C5 se realizó el perfil que permitiera elaborar el análisis de la zona de interés, para la cual se tomaron los parámetros geotécnicos obtenidos por la perforación PTAP1, ubicada 5m al sur del punto más alto del perfil correspondiente. En el análisis de dicha perforación se extrajeron 3 muestras, las cuales posteriormente fueron utilizadas en los respectivos ensayos de laboratorio, para los cuales se incluyen los parámetros geotécnicos en el software

Slide, como parte del primer horizonte de suelo, hasta los 3m de profundidad registrados en la perforación y materiales analizados. En la información recolectada inicialmente, se resalta que, para los ensayos de las 3 muestras se obtienen cohesiones bastante bajas, por lo que se debe tener en cuenta este parámetro para los resultados obtenidos mediante el modelo. Para los siguientes horizontes de suelo se tomaron los datos de la parametrización geotécnica, realizada a partir de la geología superficial y aplicada para el modelo Scoops3D, de donde se utilizaron los parámetros registrados para los horizontes de suelo de la zona 2, en la cual se ubica el corte espacialmente.

Según los resultados arrojados por los modelos de Scoops3D y TRIGRS, en la zona hay influencia de un polígono de amenaza alta, que interviene en la parte media del perfil. La modelación de los diferentes escenarios y el análisis de los métodos estudiados mediante el software Slide, permiten entender la zona analizada como de amenaza alta, ya que los  $FS$  son inferiores a 1,05 y 1,5 para escenarios pseudoestáticos y estáticos respectivamente, adicionalmente se tienen  $PF$  de hasta el 41,4% y  $\beta$  muy cercanos a 0 (ver Tabla 84).

Teniendo en cuenta la presencia del polígono de amenaza alta en la zona y la obtención de factores de seguridad inferiores a 1 en la mayoría de los escenarios y metodologías empleadas para condiciones pseudoestáticas, se debe interpretar la sección estudiada como una zona con probabilidad de falla. Por medio del software Slide se realizaron variaciones en el nivel freático, buscando obtener  $FS$  superiores a 1,05, pero se demostró que el nivel freático no influye en la superficie de falla, razón por la cual se procedió a construir terrazas sobre el talud, las cuales funcionaron muy efectivamente para conseguir  $FS$  mayores a 1,1 y  $PF$  de máximo 19,3%, tal como se observa en la Figura 189, donde se evidencia la reducción en las probabilidades de falla luego de la construcción de las terrazas, incluso en el escenario más crítico (sismo circular). Finalmente, según los resultados arrojados por Slide, la construcción de las terrazas resulta ser una obra de remediación muy efectiva para conseguir reducir significativamente las probabilidades de falla en la zona, por lo cual se recomienda analizar y diseñar dicha obra.

#### 12.8.6. Análisis de estabilidad para el corte C6

A partir del corte C6 se construyó el perfil correspondiente, buscando analizar la zona previamente definida como objeto de estudio, en la cual se tomaron los parámetros geotécnicos obtenidos por la perforación P4, ubicada 39m al

Tabla 84: Resultados para C5 y escenario más crítico con sismo y sin sismo.

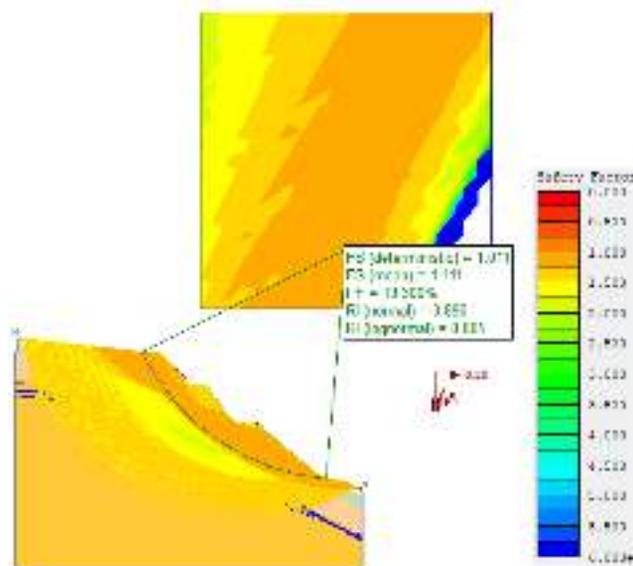
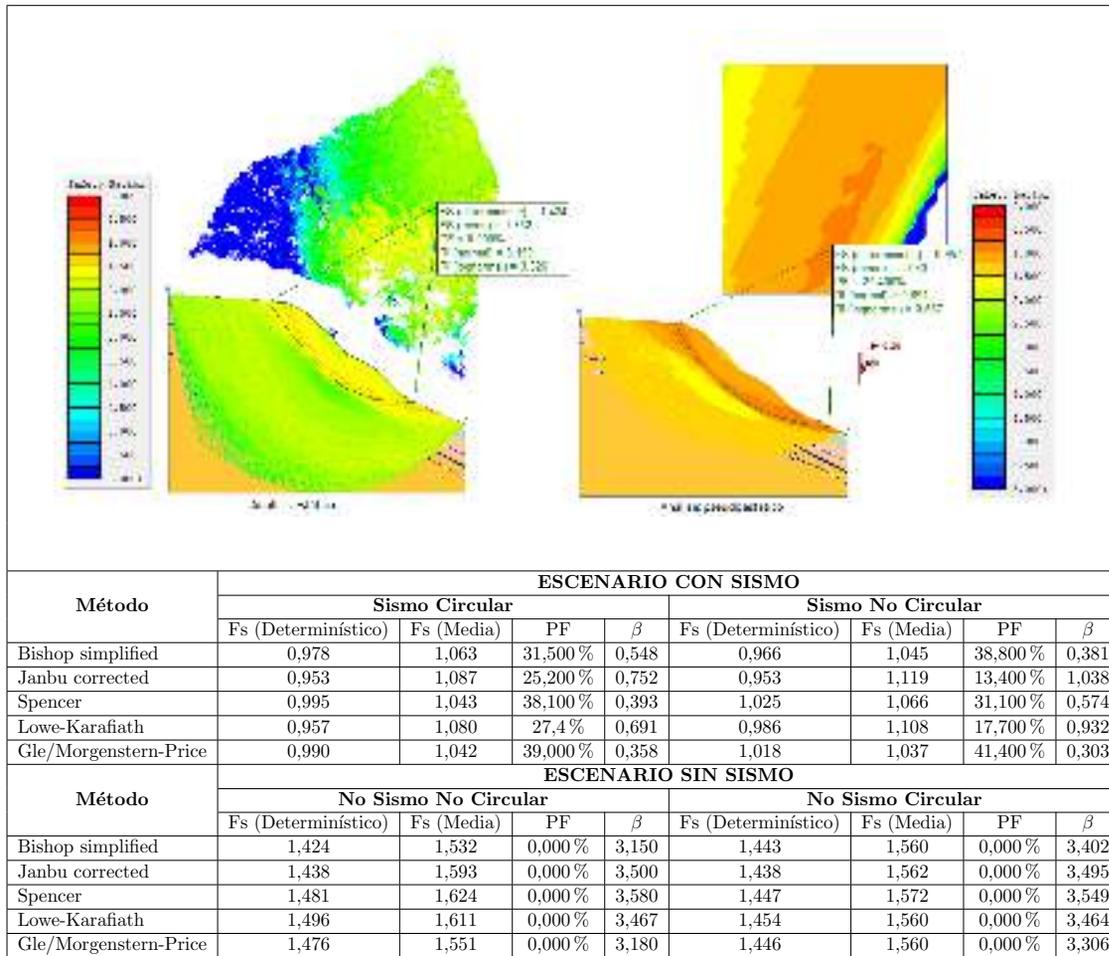


Figura 189: Perfil del corte C5 en escenario más crítico (sismo circular) con terracedo.

norte de la zona alta del perfil. Para dicha perforación, a partir de la descripción del material, en el que se tiene un horizonte de suelo residual con textura arcillosa, de alta consistencia, en donde el material se encuentra totalmente meteorizado y no conserva estructura alguna de la roca fresca; se incluyen en Slide los parámetros resultantes del análisis del material, realizado por medio de ensayos de laboratorio para la única muestra extraída, como parte del primer horizonte de suelo, hasta los 3m de profundidad registrados en la perforación y material analizado. Para los siguientes horizontes de suelo se tomaron los datos de la parametrización geotécnica, realizada a partir de la geología superficial y aplicada para el modelo Scoops3D, de donde se utilizaron los parámetros registrados para los horizontes de suelo de la zona 2, en la cual se ubica el corte espacialmente.

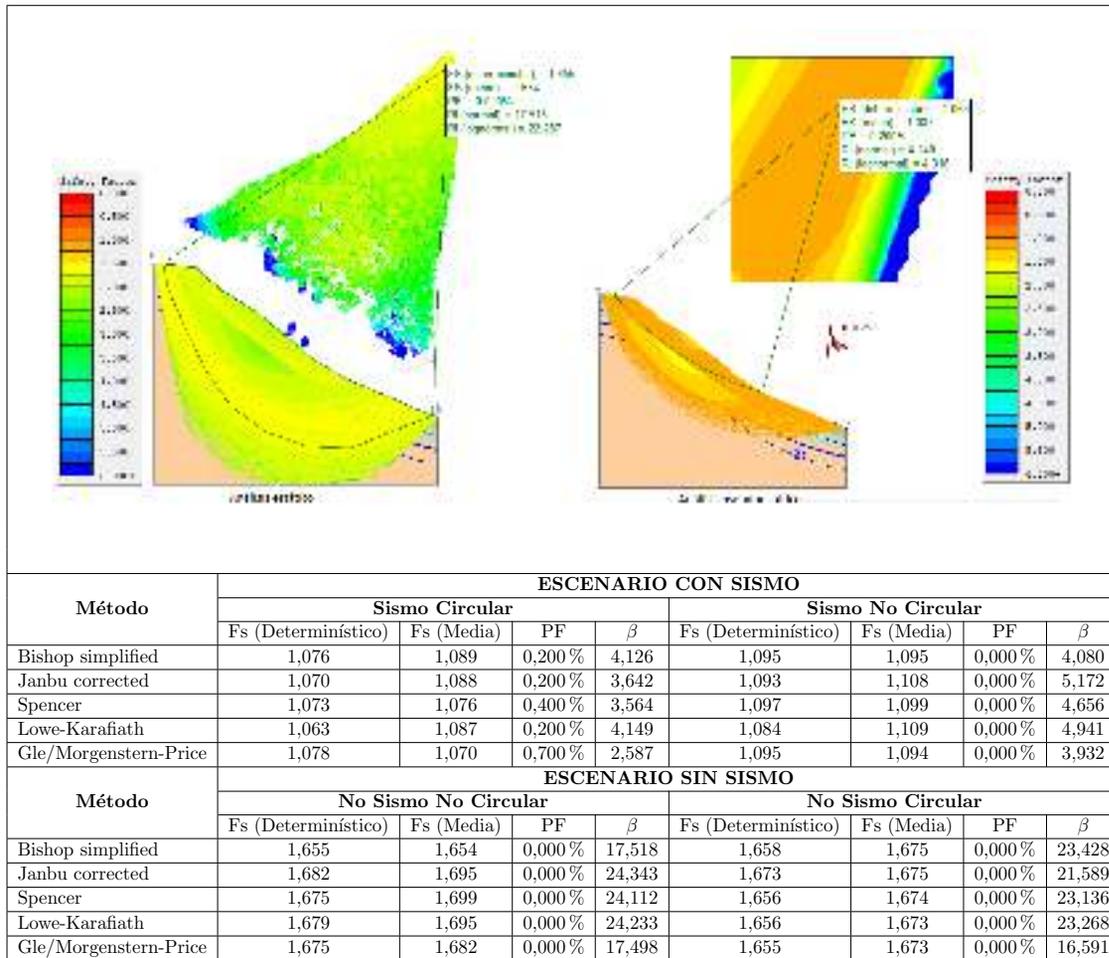
Previamente para el modelo de Scoops3D, la zona representada en el corte C6 se encuentra ubicada en amenaza baja, mientras que para TRIGRS se tiene un polígono de amenaza alta en un segmento de alta pendiente sobre el perfil. Además, a partir de las interpretaciones heurísticas realizadas en la visita al antiguo ETCR Los Monos, se identifica un punto de control sobre el corte, dándole una mayor importancia a la necesidad de analizar la zona, ya que se tienen indicios que pueden representar probabilidades de falla.

El análisis de los métodos estudiados en los diferentes escenarios mediante el software Slide, permiten entender la zona de estudio como de amenaza baja, en donde se obtienen  $FS$  mayores a 1,06 para escenarios pseudoestáticos, asociados a  $PF$  de máximo 0,7%, además, en condiciones estáticas los  $FS$  son mayores a 1,65 y se reducen todas las probabilidades de falla (ver Tabla 85). Por último, no se recomienda la intervención del talud, ya que según los resultados arrojados por el software Slide, la zona se encuentra estable y no es necesaria ninguna obra de remediación.

### 12.8.7. Análisis de estabilidad para el corte C7

Dicho perfil se trazó en base a las características geomorfológicas de la zona, su trazado comprende una área cóncava asociada a un movimiento en masa y se puede observar en la parte superior del perfil la zona de la corona. En este análisis en específico se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos en los software Scoops3D y TRIGRS para determinar el grado de amenaza asociado al perfil C7. Los resultados obtenidos para ambos modelos indican que la zona por donde se trazó el perfil C7 presenta en general un nivel de amenaza media,

Tabla 85: Resultados para C6 y escenario más crítico con sismo y sin sismo.

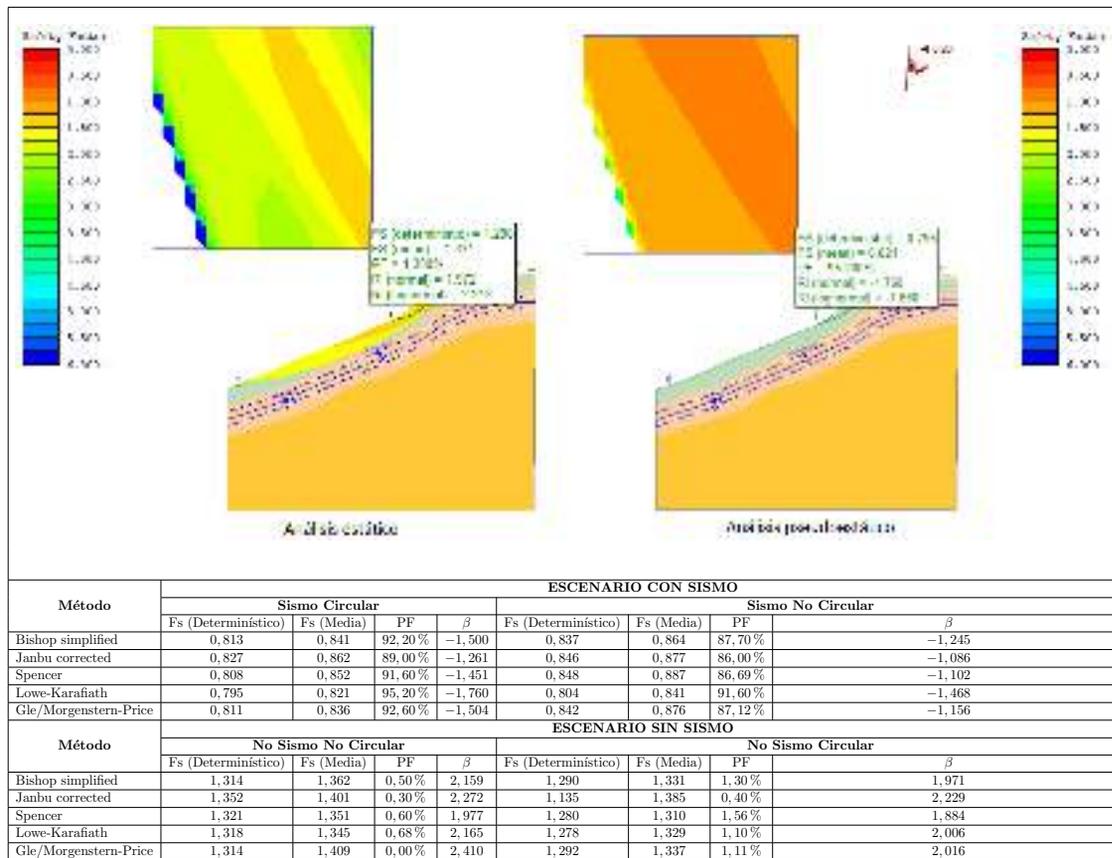


con un sector en particular ubicado sobre la mitad de la ladera que presenta un grado de amenaza alta. Dado estos resultados se hizo necesario evaluar la estabilidad del terreno y determinar la probabilidad de falla de la ladera.

Para el análisis de estabilidad se tuvieron en cuenta los parámetros geotécnicos de la perforación PTAP1 para la parte alta del perfil y se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos en el apique seis para la zona inferior, adicionalmente los datos para las capas más profundas se obtuvieron de Scoops3D . Los resultados de estos ensayos arrojaron un material en la zona superior del perfil un material arero-limoso de color café compuesto por arenas (71,3%), gravas (0,2%) y finos (28,5%) en la parte más superficial y un material limoso de baja plasticidad (café) compuesto por finos (96,3%) y arena (3,7%) en la zona más profunda. Para el tramo inferior del perfil se obtuvo el mismo material limoso de baja plasticidad pero con un cambio en el valor del peso unitario. Con la anterior información y los datos obtenidos de Scoops3D para las capas inferiores

se realizaron los análisis con los diferentes escenarios propuestos y utilizando diferentes métodos para determinar el nivel de amenaza asociado al perfil C7.

Tabla 86: Resultados de Slide para C7 y escenario más crítico



En un escenario con sismo se obtuvo que independiente del tipo de falla (*circular y no circular*), la probabilidad de falla fue 80% y obteniendo valores menores a 1 para el índice de confiabilidad ( $\beta$ ). También los factores de seguridad para este escenario fueron menores a 0,848, siendo el método de *Lowe-Karafiath* con un factor de seguridad de 0,795 el escenario más crítico asociado a un tipo de falla circular. se debe concluir que el talud en este escenario falla y por ende su nivel de amenaza es alta.

Analizando el escenario sin sismo en el perfil, se obtuvo que la probabilidad de falla oscila entre (0 – 0,68%) si el tipo de falla es no circular, pero esta probabilidad aumentó si el tipo de falla es circular hasta 1,56%). En la revisión se tiene que el factor de seguridad en este escenario es de 1,280 para el método más crítico (*Spencer*) y el máximo encontrado fue de 1,352 para este mismo método pero para un modo de falla circular. Con los anterior tenemos que la ladera no cumple la norma (1,5%) para el factor de seguridad y se establece

un grado de amenaza media debido al índice de confiabilidad situado entre 1,884 y 2,410. Los niveles de amenaza para esta ladera pueden estar asociados a las características geomorfológicas del perfil, donde la concavidad en la parte media de ladera pueden indicar lo propenso a movimientos en masa en la zona, en conjunto con la configuración de los parámetros geotécnicos obtenidos a partir de los ensayos en campo y Scoops3D.

Debido al grado de amenaza en la ladera se hizo necesario la intervención con obras que permitieran aumentar el factor de seguridad y aumentar la estabilidad del terreno para un escenario pseudoestático. Para la ladera fue necesario realizar varios métodos de estabilización, inicialmente se propuso la instalación de un sistema de drenes que permitiera abatir 5m el nivel freático en la zona más crítica del perfil. Los resultados arrojados con el sistema de drenes no reflejó un aumento en el factor de seguridad, arrojando valores de 0,859 para el escenario más crítico, es decir, el escenario con sismo y el método de *Lowe-karafieth*. Continuando con las obras, un sistema de terrazas fue realizado en la zona baja y alta de la ladera pero los resultados en el factor de seguridad no variaron con respecto a los drenes. Por ultimo, fue necesario la instalación de obras de anclaje de tipo soil nail en la parte media y alta de la ladera, esto permitió aumentar el factor de seguridad en la zona de las terrazas a 1,360 y en la zona de los anclajes a 1,660. Solo en un tramo de la terraza el factor de seguridad fue de 0,981, se propone para esta zona la instalación de plantas con raíces profundas que permitan aumentar la cohesión en ese sector de la ladera. Este mismo tipo de obras fueron establecidas para un escenario estático y el aumento del factor de seguridad fue mayor a 1,551 y con una probabilidad de falla menor a 0,001 %. En conclusión con una variedad de obras de estabilización se puede obtener un nivel de amenaza media-baja para la ladera perteneciente al corte C7.

#### **12.8.8. Análisis de estabilidad para el corte C8**

Para la construcción del perfil C8 se tomaron los parámetros geotécnicos obtenidos a partir de la perforación P9 y los apiques 6 y 7. En la construcción del perfil se obtuvieron dos materiales compuestos por un suelo residual en la parte superficial del perfil y un limo de alta plasticidad compuesto por finos (89,3 %) y arena (10,7 %) encontrado en la parte media de la ladera. En el corte también fue evaluaron los resultados obtenidos en el software Scoops3D y TRIGRS, en ambos el nivel de amenaza media se encuentra en toda la zona y dada sus

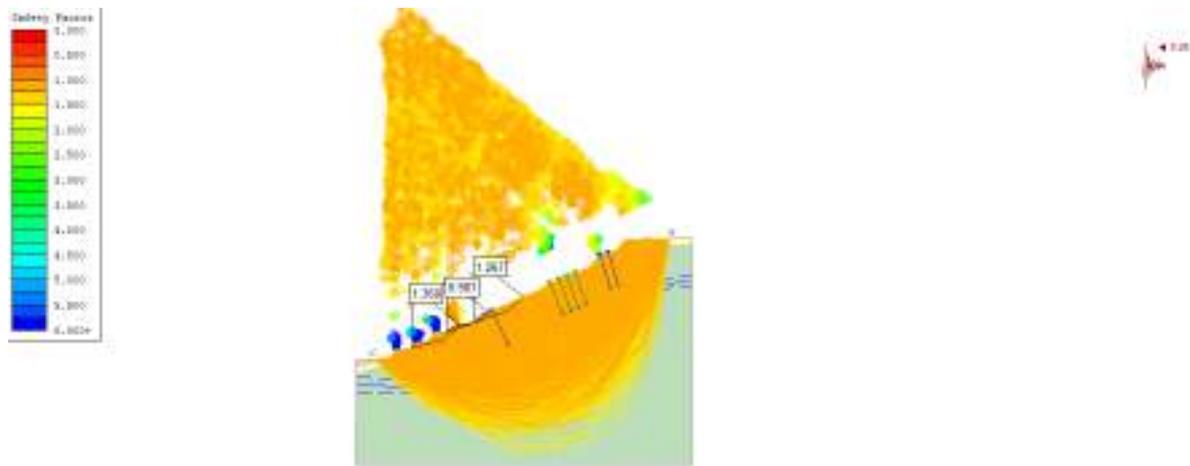
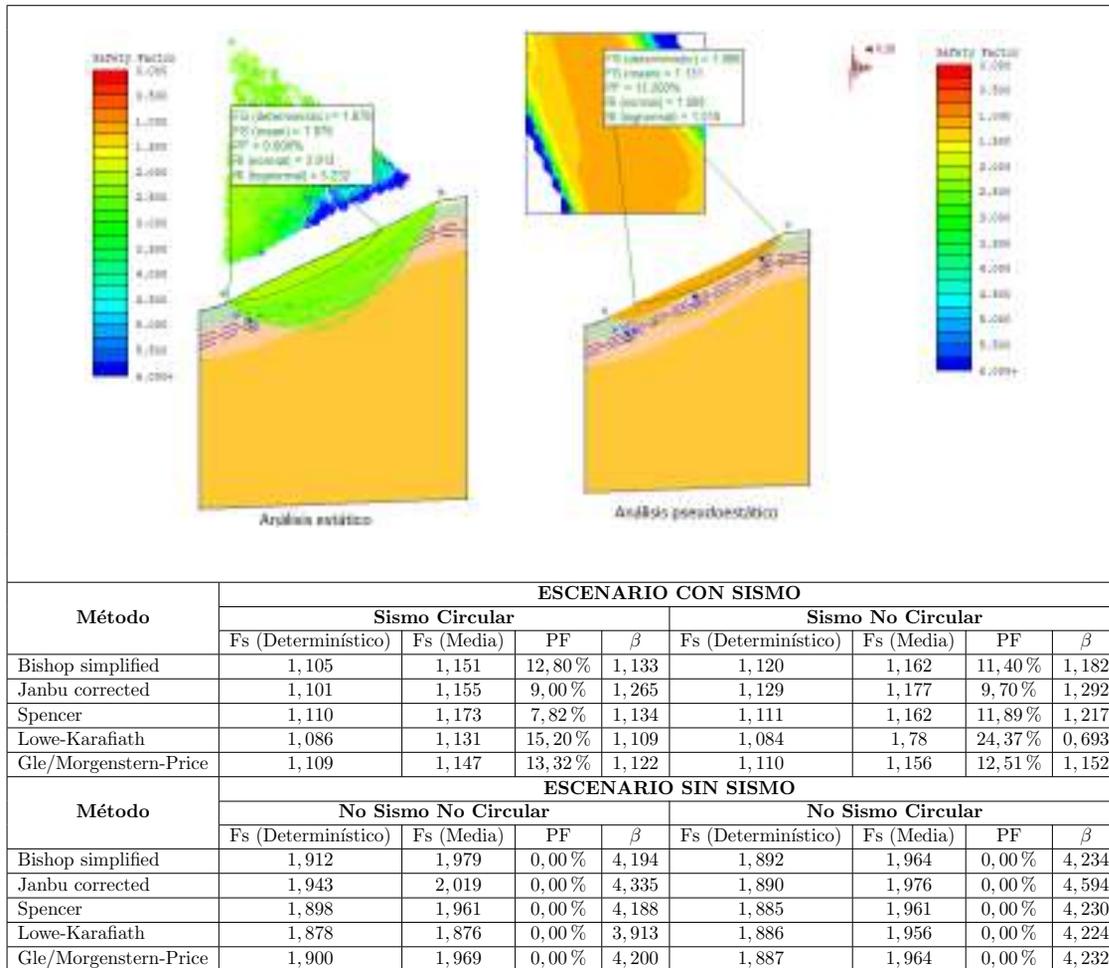


Figura 190: Perfil del corte C7 en escenario más crítico (Sismo Circular) con disminución del nivel freático, terrazas y anclajes.

condiciones de alta pendiente se hace necesario el análisis de estabilidad para el perfil y de esta manera conocer el grado de amenaza.

Los resultados para un escenario sin sismo indica que para un tipo de falla circular, el factor de seguridad ( $FS$ ) mínimo es de 1,885 para el método *Spencer*, este método arroja una probabilidad  $< 0,001\%$  y un índice de confiabilidad  $> 2,5$ , lo que supone un nivel de amenaza baja para la ladera. Los resultados para el resto de métodos, reafirman el grado de amenaza baja para un modo de falla circular. Cuando se tiene este mismo escenario sin sismo pero el tipo de falla es no circular, los resultados arrojaron factores de seguridad mayores a 1,878, ajustándose a la norma e indicando que la ladera en este escenario es estable. Por otra parte cuando se estableció un coeficiente sísmico de 0,26 y un tipo de falla circular, el factor de seguridad ( $FS$ ) más crítico fue de 1,086 (*Lowe-Karafiath*), obteniendo una probabilidad de falla ( $PF$ ) 15,20% y un índice de confiabilidad de 1,109, ahora cuando se estableció este mismo coeficiente pero se cambió el tipo de falla a no circular (planar) el factor de seguridad más crítico disminuyó para este mismo método a 1,084, mostrando un índice de confiabilidad de 0,693. Con estos resultados obtenidos en cada uno de los métodos evaluados se concluye que se están ajustando a la norma (1,05) para el factor de seguridad. Con lo anterior se establece que la zona perteneciente al corte C8 presenta un grado de amenaza media-baja y que no es necesario implementar obras de contención en el terreno.

Tabla 87: Resultados de Slide para C8 y escenario más crítico



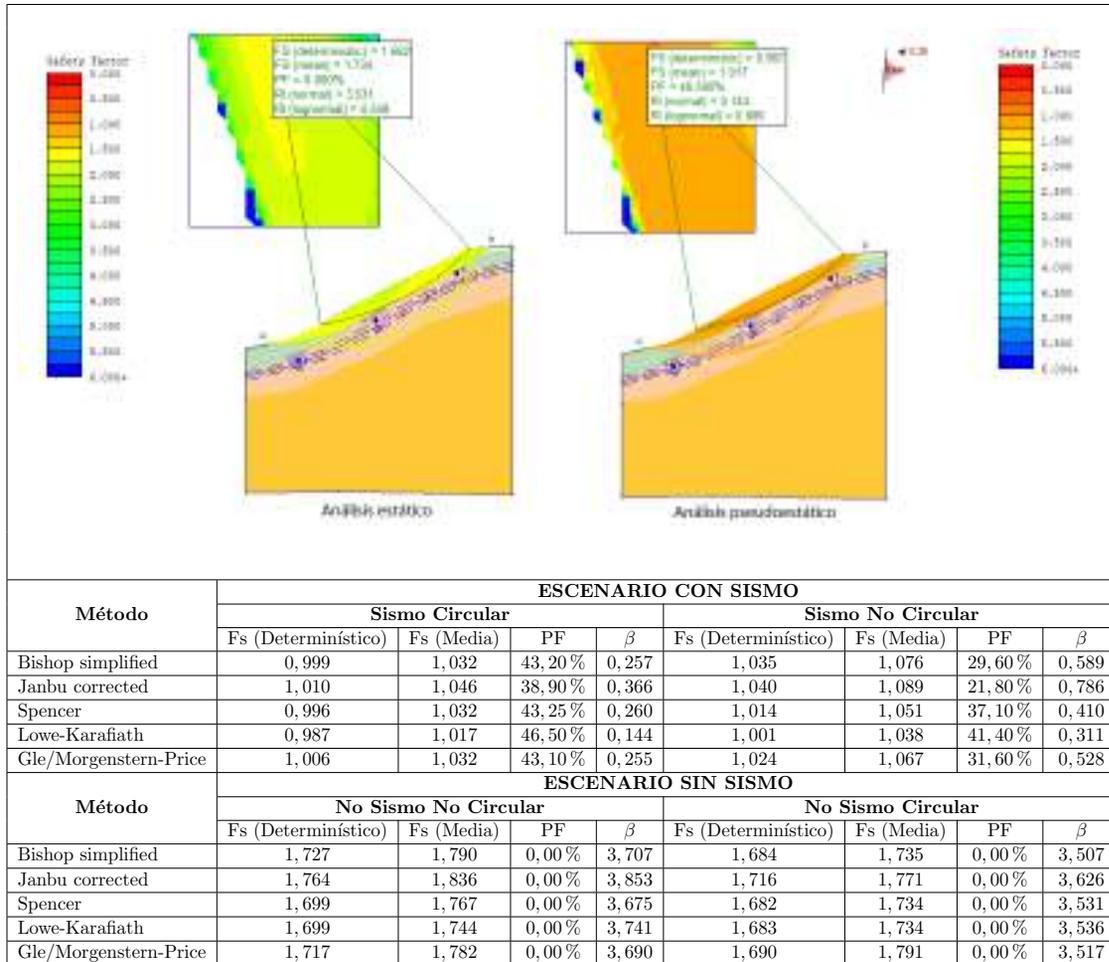
### 12.8.9. Análisis de estabilidad para el corte C9

A partir del ensayo de campo (*apique 2*) y en dirección SW se construyó el corte C9 que permitiera obtener el perfil correspondiente de esa parte de la ladera. Para este corte se tuvieron en cuenta las condiciones de alta pendiente de la zona y los resultados obtenidos en el software Scoops3D y TRIGRS. En ambos métodos se identificó un grado de amenaza media que motivó a evaluar la estabilidad de esta ladera y determinar la probabilidad de falla y su nivel de amenaza por el software Slide.

Para la construcción del perfil se tuvieron en cuenta los parámetros geotécnicos de la perforación 9 (*P9*) y del apique 2 en el tramo superior del perfil. Para dicha perforación se tiene un limo de alta plasticidad de color café compuesto por finos (89,3 %) y un material arenoso (10,7 %), mientras que para el apique 2 se tiene un material gravo-limoso con arena; además para las capas inferior-

res se tuvo en cuenta la información proporcionada por Scoops3D. Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se obtuvieron los resultados en el software Slide, teniendo en cuenta los distintos escenarios y métodos.

Tabla 88: Resultados de Slide para C9 y escenario más crítico



Los resultados obtenidos inicialmente para un escenario sin sismo evidenció que la ladera presenta un nivel de amenaza baja, ya que las probabilidades de falla son inferiores a 0,001, adicionalmente sin importar el modo en que falla la ladera, el factor de seguridad para cada método es mayor a 1,5. En segundo caso tenemos un escenario sísmico cuando la ladera es sometida a un coeficiente de 0,26, obteniendo un escenario crítico con un tipo de falla circular que arroja un factor de seguridad de 0,987 para método *Lowe-Karafiath* y una probabilidad de falla de (94,50%). Estos resultados no difieren si se tiene el mismo escenario con sismo pero el tipo de falla es no circular, ya que solo para el método *Janbu corrected* se tiene un factor de seguridad de 1,040 pero aún con probabilidades de falla mayores al 16%.

Dado que los resultados entregados por el software Slide muestran que solo en un escenario con sismo la ladera presenta un nivel de amenaza alta, y dado que el tipo de material superficial es de alta plasticidad se requiere la intervención con obras que permitan estabilizar el terreno. Se intervino con un sistema de filtros en la zona media de la ladera abatiendo el nivel freático 5m. Este tipo de intervención en la zona no es suficiente para que el factor de seguridad sea admisible, por tal motivo fue necesario la construcción de anclajes en la parte baja y media de la ladera, resultando en un aumento admisible por norma del factor de seguridad mínimo de (1,098). Adicionalmente se obtuvieron factores de seguridad para los planos de falla subsuperficial de (1,271) para el tramo superior y 1,197 para el tramo medio de la ladera. Con estos valores, se concluye que la ladera es estable en este escenario y con una buena ejecución en los diseños propuestos permiten obtener un nivel de amenaza media-baja en la zona.

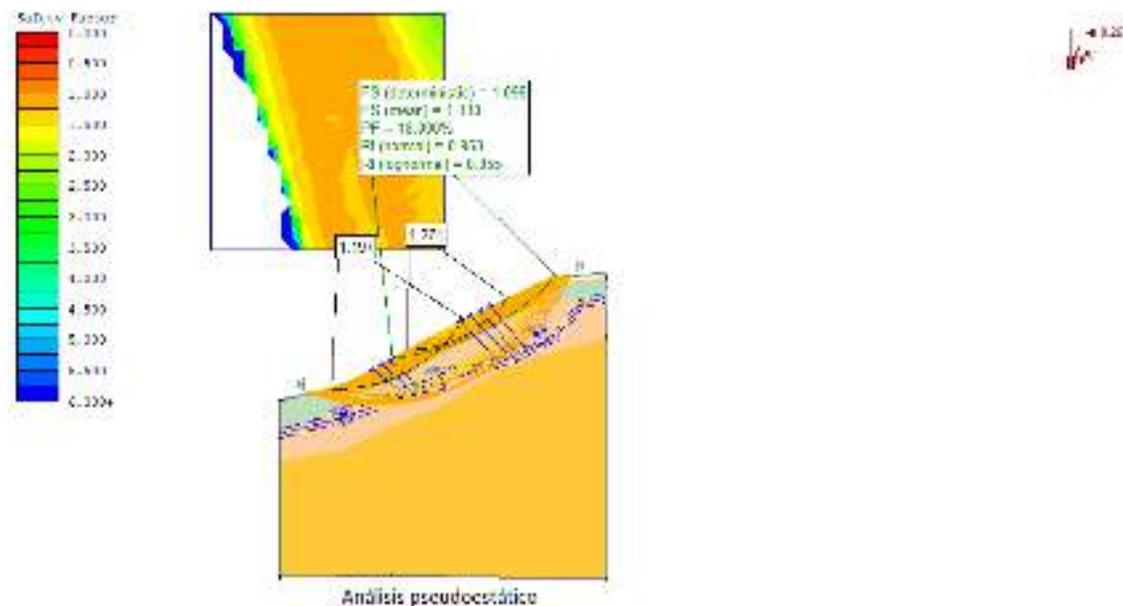


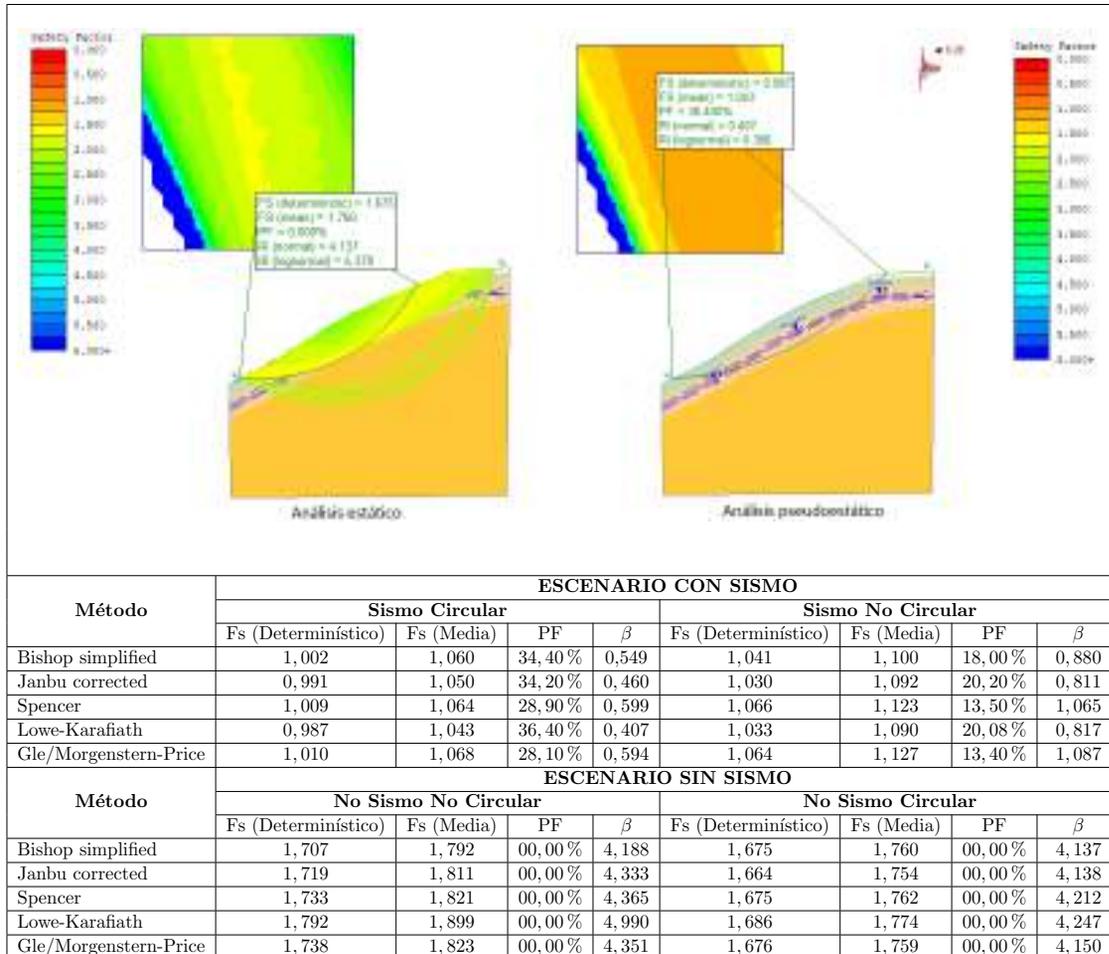
Figura 191: Perfil del corte C9 en escenario más crítico (Sismo Circular) con disminución del nivel freático y anclajes.

### 12.8.10. Análisis de estabilidad para el corte C10

A partir del apique 1 y en dirección SW se construyó el perfil C10 correspondiente, buscando analizar la estabilidad de la ladera en estudio. Para tal objetivo, fue necesario obtener los parámetros geotécnicos del apique 1 y la perforación 9, obteniendo materiales gravo-limosos para el apique y limosos de alta plasticidad para la perforación. Previamente se estableció que para los mo-

delos Scoops3D y TRIGRS la zona representada para el corte C10, se encuentra ubicada en amenaza media, y dada sus características de pendiente media-alta se hace necesario evaluar este perfil y evaluar su estabilidad y grado de amenaza.

Tabla 89: Resultados de Slide para C7 y escenario más crítico



Los resultados obtenidos muestran que para un escenario sin sismo y para ambos tipos de falla, la ladera en términos de estabilidad presenta un factor de seguridad mayor a 1,675. De igual forma la ladera presenta una probabilidad de falla de 0,00 % y un índice de estabilidad  $\beta$  mayor a 4,188 para un tipo de falla circular y de 4,137 para una falla planar. Con estos resultados se establece que la zona es estable y presenta un grado de amenaza baja. Evaluando la ladera con un escenario sísmico y un coeficiente de 0,26, se establece que la zona en general es inestable, ya que las probabilidades de falla son mayores al (16 %). Si se observan los resultados del factor de seguridad en este escenario, tenemos que el método *Lowe-Karafiath* se presenta como el más crítico con un *FS* de 0,987 y un índice de confiabilidad de 0,407 cuando el tipo de falla es circular. En

conclusión se tiene que la ladera al someterse a un evento sísmico corre el riesgo de inestabilidad y tendría un grado de amenaza alta por dichas condiciones, por tal motivo es necesario realizar obras que permitan aumentar el factor de seguridad cuando ocurran este tipo de eventos.

En la ladera se estableció un sistema de filtros que permitieran abatir el nivel freático en la zona de mayor complejidad y con el factor de seguridad más crítico. Los resultados obtenidos con el abatimiento del nivel freático a 7m fue un aumento en el método de *Janbu corrected* de 0,972, insuficiente para la norma (1,05); por lo tanto fue necesario la construcción de terrazas en la parte baja de la ladera y un grupo de anclajes en esta misma zona y en la parte superior de la ladera, arrojando un factor de seguridad de 1,056, admisible en la norma y permitiendo mantener estable la ladera ante estas condiciones y asegurando un nivel de amenaza media en la zona. Es necesario evaluar de una manera mas detallada en los diseños y posteriores ejecuciones de obras de mitigación en la zona que permitan establecer la zona como amenaza baja.

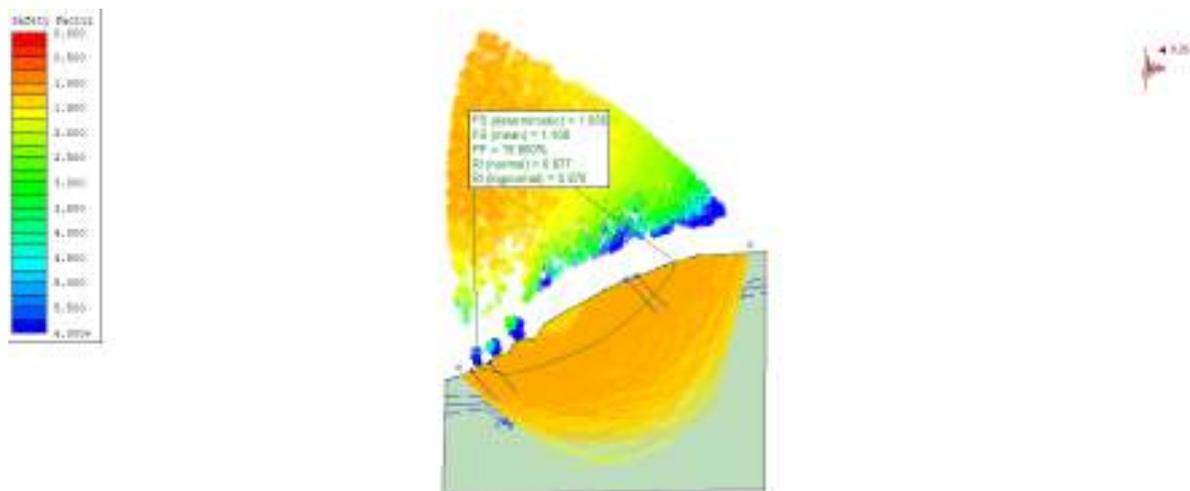


Figura 192: Perfil del corte C10 en escenario más crítico (Sismo Circular) con disminución del nivel freático, terrazas y anclajes.

# Referencias

- Assis, A., Espósito, T., Gardoni, M., Silva, P., y Maia, J. (2012). Métodos estadísticos e probabilísticos em geotecnia. *Apostila do curso de Pós-Graduação em Geotecnia, UNB, Brasília*.
- ASTM. (2011). ASTM D5777 Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation [Manual de software informático].
- Augusto, C., y Hidalgo, C. (2011, 07). Herramientas para análisis por confiabilidad en geotecnia: La teoría.
- Baecher, G., y Christian, J. (2003). *Reliability and statistics in geotechnical engineering*. Wiley. Descargado de <https://books.google.com.co/books?id=42r6CKatuwC>
- Baum, R., Savage, W., Godt, J., y (U.S.), G. S. (2008). *Trigrs: A fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, version 2.0*. U.S. Geological Survey. Descargado de <https://books.google.com.co/books?id=ENsFuQEACAAJ>
- Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Géotechnique*, 5(1), 7-17. doi: 10.1680/geot.1955.5.1.7
- Bowles, L., y cols. (1996). *Foundation analysis and design*. McGraw-hill.
- Catani, F., Segoni, S., y Falorni, G. (2010, 05). An empirical geomorphology-based approach to the spatial prediction of soil thickness at catchment scale. *Water Resources Research*, 46. doi: 10.1029/2008WR007450
- Christian, J., Ladd, C., y Baecher, G. (1994, 12). Reliability applied to slope stability analysis. *Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE*, 120, 2180-2207. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:12(2180)
- Cruden, D. (1996, 01). Cruden, d.m., varnes, d.j., 1996, landslide types and processes, special report , transportation research board, national academy of sciences, 247:36-75. *Special Report - National Research Council, Transportation Research Board*, 247, 76.
- Dearman, W. (1974). Weathering classification in the characterisation of rock for engineering purposes in british practice. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 9(1), 33-42.
- de Ingeniería Sísmica, A. C. (2009). AIS.
- de Ingeniería Sísmica, A. C. (2010). AIS.
- de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación.
- Fellenius, W. (1936). Calculation of stability of earth dam. En (p. 445-462).
- Gardner, W. R. (1958). Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85, 228-232.
- Gonzalez, A. J. (1999). Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el spt. *X Jornadas geotécnicas de la ingeniería colombiana*.
- Hodnett, M., y Tomasella, J. (2002). Marked differences between van genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: a new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils. *Geoderma*, 108(3-4), 155-180.
- Hungr, O. (1987). An extension of bishop's simplified method of slope stability analysis to three

- dimensions. *Géotechnique*, 37(1), 113-117. doi: 10.1680/geot.1987.37.1.113
- Hutchinson, J. N. (1988). General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology : Proc 5th international symposium on landslides, lausanne, 10–15 july 1988v1, p3–35. publ rotterdam: A a balkema, 1988. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 26.
- INGEOMINAS. (2003). Geología de la Plancha 343 Silvia. , 106.
- Lam, L., y Fredlund, D. G. (1993). A general limit equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis. , 30(6), 905–919. doi: 10.1139/t93-089
- Li, A., Yue, Z., Tham, L., Lee, C., y Law, K. (2005, 02). Field-monitored variations of soil moisture and matric suction in a saprolite slope. *Canadian Geotechnical Journal - CAN GEOTECH J*, 42, 13-26. doi: 10.1139/t04-069
- Louie, J. (2001, 04). Faster, better: Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91. doi: 10.1785/0120000098
- Montenegro, L. (2014). Calibración del método de parámetros de resistencia con spt en suelos de la región llanera colombiana. *Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá*.
- Montoya, C. H., y Asis, A. P. D. (2011). Herramientas para análisis por confiabilidad en geotecnia: Aplicación. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 10(18), 69-78.
- Park, C., Miller, R., y Xia, J. (1999, 05). Multichannel analysis of surface waves (masw). *Geophysics*, 64. doi: 10.1190/1.1444590
- Rahardjo, H., Lim, T., Chang, M.-F., y Fredlund, D. (1995, 02). Shear-strength characteristics of a residual soil. *Canadian Geotechnical Journal - CAN GEOTECH J*, 32, 60-77. doi: 10.1139/t95-005
- Reid, M. E., Christian, S., Brien, D., y Henderson, S. (2015). *Scoops3D — Software to Analyze Three-Dimensional Slope Stability Throughout a Digital Landscape*. U.S. Geological Survey. Descargado de <https://pubs.er.usgs.gov/publication/tm14A1> doi: 10.3133/tm14A1
- Richards, L. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1, 318-333.
- Saxton, K., Johnson, H., y Shaw, R. (1974). Modeling evapotranspiration and soil moisture [watershed hydrology]. *Transactions of the ASAE (USA)*.
- SGC. (2014). Memoria Explicativa Del Mapa Geomorfológico Memoria Explicativa Del Mapa Geomorfológico. (009), 1–132.
- SGC. (2017). *Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25000*. doi: 10.1002/chem.201301917
- SGC, S. G. (2016). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Servicio Geológico Colombiano-SGC.
- Sidle, R., y Ochiai, H. (2013). *Landslides: Processes, prediction, and land use*. doi: 10.1029/WM018
- Skempton, A., y Hutchinson, J. (1969). Stability of natural slopes and embankment foundations..
- Srivastava, R., y Yeh, T.-C. J. (1991). Analytical solutions for one-dimensional, transient infiltration toward the water table in homogeneous and layered soils. *Water Resources Research*, 27(5), 753-762. Descargado de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/90WR02772> doi: 10.1029/90WR02772
- Taylor, D. (1948). *Fundamentals of soil mechanics*. J. Wiley. Descargado de [https://books.google.com.co/books?id=z\\_1RAAAAAMAAJ](https://books.google.com.co/books?id=z_1RAAAAAMAAJ)
- USCACE. (1999). Risk-based analysis in geotechnical engineering for support of planning studies. (ETL 1110), 2-556.
- van Westen, C. J., Castellanos, E., y Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Eng. Geol.*, 102(3-4), 112–131. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010> doi: 10.1016/j.enggeo.2008.03.010
- Wösten, J., Pachepsky, Y. A., y Rawls, W. (2001). Pedotransfer functions: bridging the gap between

available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of hydrology*, 251(3-4), 123–150.

Zhang, S., y Wang, F. (2019). Three-dimensional seismic slope stability assessment with the application of Scoops3D and GIS: a case study in Atsuma, Hokkaido. *Geoenvironmental Disasters*, 6, 14. doi: 10.1186/s40677-019-0125-9

## Capítulo 13

# Amenaza por Inundaciones y Avenidas Torrenciales

### Introducción

Para la zonificación de amenaza por inundación y avenida torrencial en el antiguo ETCR Los Monos se verifica el alcance de un evento de inundación correspondientes a un periodo de retorno de 500 años, teniendo en cuenta el caudal calculado en el capítulo de amenaza por inundación en el apartado de Estudios Básicos y el potencial volumen de sólidos calculado en el capítulo de amenaza por avenidas torrenciales en el apartado de Estudios Básicos. Finalmente el antiguo espacio territorial no es susceptible a eventos de inundación ya que se trata de una cuenca de orden cero.

### 13.1. Definición de áreas propensas a inundación

Ya que el antiguo ETCR Los Monos está ubicado sobre una divisoria de cuenca (corresponde a una cuenca de orden cero) ninguno de los cauces parece lograr el desarrollo suficiente que permita definir un dominio en el antiguo entorno del espacio territorial para la elaboración de una modelación. Con el fin de corroborar esto se emplea el levantamiento topográfico en detalle para definir las áreas propensas a inundación construyendo el mapa de elevación sobre el drenaje más cercano, también se emplea el caudal estimado con período de retorno de 500 años y se establece la profundidad a partir de ecuaciones de geometría hidráulica que han sido regionalizadas de forma similar a la metodología presentada en el capítulo de Amenaza por inundaciones en el apartado de Estudios básicos. La Figura 193 presenta el mapa de áreas propensas a inundación en el área de estudio, en este es posible apreciar que ninguna de las corrientes

interactúa de forma directa con el antiguo espacio territorial, motivo por el cual no se realiza simulación para definir la zonificación de amenaza en el espacio por los fenómenos de inundaciones ni de avenidas torrenciales.

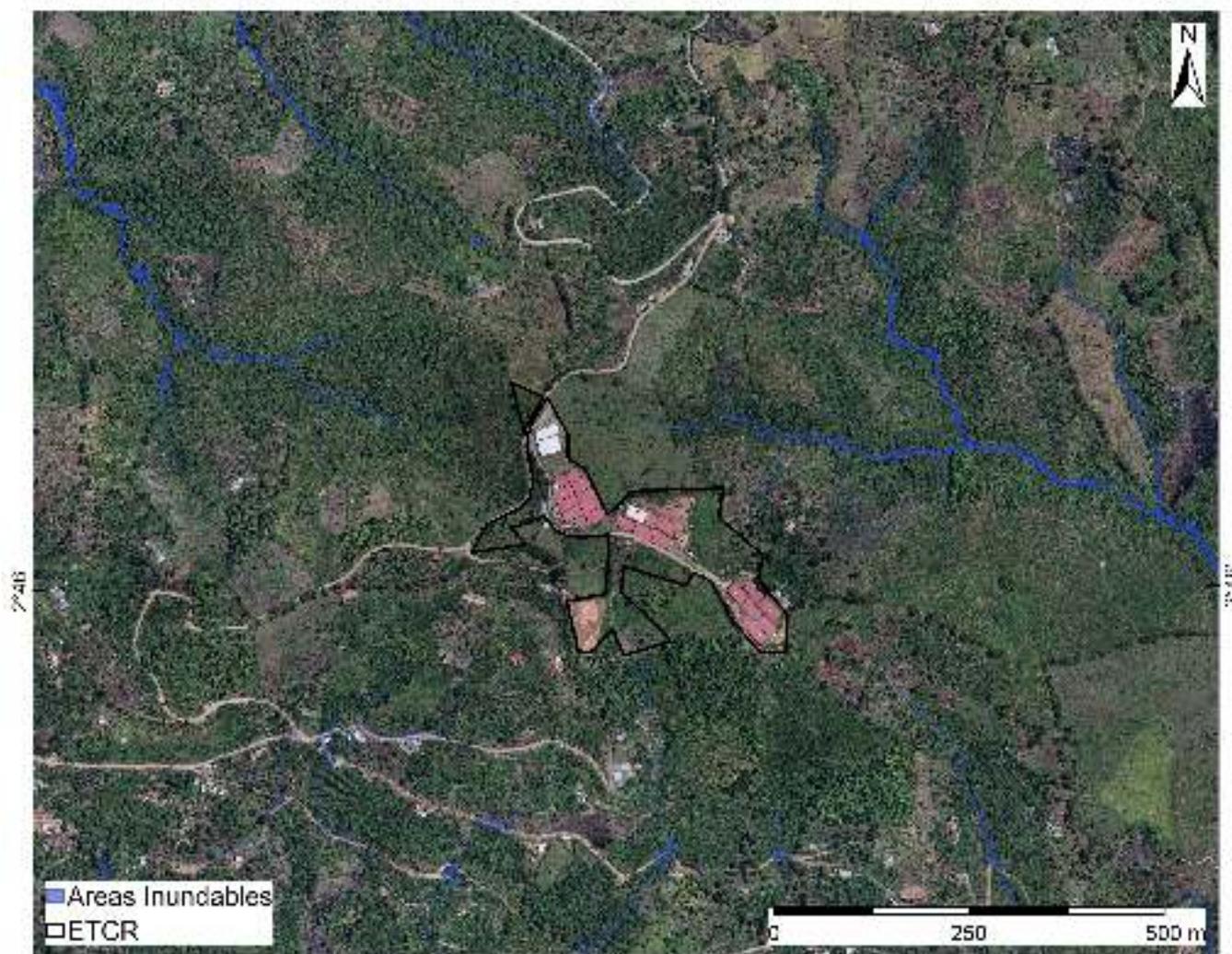


Figura 193: Áreas inundables cerca al antiguo ETCR Los Monos.

## Capítulo 14

# Vulnerabilidad

En el presente capítulo se realiza la evaluación de la vulnerabilidad, considerando tanto la exposición de los elementos (bienes físicos y personas) como su grado de fragilidad ante el evento amenazante. Según el Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo (UNDP, 2004) la vulnerabilidad es clasificada en cuatro categorías: vulnerabilidad física (pérdidas del daño físico de infraestructura y edificaciones), vulnerabilidad ambiental (pérdidas de recursos naturales), vulnerabilidad social (pérdidas de la población y estructura social), y vulnerabilidad económica (efecto de la condición económica).

La estimación de las diferentes categorías de vulnerabilidad usualmente se aborda bajo métodos basados en las ciencias naturales y sociales (Crozier y Glade, 2005). La vulnerabilidad social ante amenazas naturales se enfoca principalmente en la sociedad, mientras que la vulnerabilidad física se centra en la interacción del daño y el ambiente físico (Uzielli, Nadim, Lacasse, y Kaynia, 2008). A continuación, se presenta las metodologías empleados y resultados de la vulnerabilidad bajo el enfoque social y físico ante amenazas por movimientos en masa e inundaciones en el antiguo ETCR Los Monos.

### 14.1. Vulnerabilidad social

La vulnerabilidad en los estudios de riesgo de detalle, se supedita de manera reglamentaria a los análisis de exposición y fragilidad de los bienes y las personas expuestas, es decir, se cifra en función de los posibles niveles de daño en las infraestructuras y afectación en materia de pérdidas probables de vidas o de lesiones corporales, asociadas con los niveles de daño de las edificaciones (SGC, 2016). Esta, se analiza de acuerdo a los eventos o fenómenos más recurrentes en el territorio nacional: avenidas torrenciales, inundaciones y deslizamientos, según el decreto 1807 de 2014.

A pesar de la invisibilidad generalizada de otras formas de vulnerabilidad en los modelos de riesgo, que inciden de manera directa en la generación de escenarios, las diferentes herramientas derivadas de la norma frente a la gestión del riesgo, vienen incorporando a manera de sugerencia otros tipos de análisis que conlleven al conocimiento de esas otras vulnerabilidades, entre ellas la vulnerabilidad social, la cual puede dar cuenta de esas características del colectivo que los hace más o menos fuertes o débiles, ante la materialización del riesgo.

Aunque se esté ante reflexiones sobre asentamientos que no se han consolidado en términos infraestructurales, las personas en proceso de reincorporación son un colectivo que se viene conformando y preparando para participar en la construcción de su ámbito habitacional y relacional. En este sentido, el acercamiento a la vulnerabilidad desde una perspectiva social, es importante porque permite conocer los niveles de preparación, resiliencia y capacidades con la que cuentan las personas, y el colectivo como tal, para enfrentar la ocurrencia de un evento y/o generar prácticas sociales y culturales de protección de la vida y el territorio.

Al respecto la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres de Colombia (UNGRD, 2017), en los lineamientos para el análisis de la vulnerabilidad social, en los estudios de la gestión municipal del riesgo de desastres, expresa que, si bien para los estudios técnicos no hay vulnerabilidad sin exposición, esto no es cierto frente a la vulnerabilidad social, dado que esta se soporta en un componente de “indefensión personal” ante cualquier crisis u amenaza y que permanece aunque no exista el daño o la exposición, una gestión integral del riesgo debería entonces contemplar este aspecto. En otros términos, se expresa que el fortalecimiento de los medios de vida, la percepción del riesgo, el lazo social (UNGRD, 2017), entre otros aspectos, son constitutivos de respuestas resilientes a eventos extremos y a prácticas relacionadas con la exposición de la vida y los bienes.

Para acercarse a la vulnerabilidad social de los antiguos ETCR, frente a una zona en proceso de consolidación que se proyectará bajo los estándares de la norma, se identificaron dos factores de vulnerabilidad desde la perspectiva social a evaluar, y que permiten, de acuerdo a lo anterior, identificar aspectos de demografía y estructura social que expresen sus preexistencias, antes del riesgo. Estos factores son las fragilidades y las capacidades.

La primera, las fragilidades, se describen a partir de dos dimensiones: una social y una económica. La fragilidad social, da cuenta de las condiciones del co-

lectivo y las personas ante aspectos mínimos para el disfrute de derechos, como son el acceso a la educación y la salud. La fragilidad económica, establece las condiciones de acceso a recursos que les permiten la satisfacción de necesidades básicas. Frente al riesgo, estos aspectos son esenciales para instaurar procesos de preparación y fortalecimiento de capacidades para la reducción del riesgo y el manejo de las emergencias.

Las capacidades por su parte, dan cuenta de las posibilidades que brinda el tejido social existente a las personas, en la generación de seguridad, confianza y gestión para el desarrollo. Estas se concibieron en tres dimensiones: capacidad organizativa -direccionada a establecer los niveles de organización-, confianza y participación, capacidad de gestión y cooperación -que da cuenta del relacionamiento de los habitantes del antiguo ETCR, mediante sus figuras de liderazgo con los actores en los ámbitos territoriales en los que habitan específicamente con los de la GRD y con otros actores en diferentes niveles territoriales-; por último se identifica la capacidad de apropiación que tiene que ver con los imaginarios de la vida en el asentamiento, con respecto al tiempo, al crecimiento de la población y a sus aspiraciones de permanencia, esto, en aras de comprender qué tan cercana es su relación con el territorio, puesto que entre más cercana es esta relación, mayor capacidad de gestión de los diversos aspectos del territorio existe.

Para el análisis de la vulnerabilidad desde la perspectiva social se establece un índice, definido mediante variables e indicadores asociados a las categorías mencionadas; a cada una de las variables se le estableció un rango de calificación cualitativa: alto, medio y bajo, donde según corresponda a la fragilidad o la capacidad, e igual con los demás parámetros; y una calificación cuantitativa que da cuenta, mediante un gráfico de redes, del cálculo de las variables asociadas a cada categoría. En la Tabla 90 se observa la escala de calificación.

Los datos para la realización de esta metodología se construyeron a partir de las bases de datos, resultado de la encuesta realizada en el marco de este proyecto a las familias de los antiguos ETCR <sup>1</sup> La muestra está delimitada a la presencia de los miembros de la familia en las viviendas, dada el alto nivel

---

<sup>1</sup>Nota metodológica. Al inicio del proceso se pretendió realizar un censo, es decir una encuesta estructurada a la totalidad de la población, pues el tamaño del universo lo permitía. Sin embargo, una vez en terreno, se evidenció que la mayoría de la población, por motivos laborales, habita actualmente en viviendas familiares o proyectos productivos en zonas del municipio diferente al ETCR. Con todo y la situación descrita se logró encuestar al un número de personas correspondiente al 37.72 % de las viviendas (83 de 220). Por esta razón, ya en el proceso, se tomó la decisión de aplicar la encuesta sobre la muestra cualitativa denominada muestra de caso tipo (Hernández-Sampieri otros, 2010: 397). Después de finalizada la aplicación puede hablarse de una muestra representativa no probabilística, seleccionada subjetivamente, pues con la muestra abordada se cobijaron las características heterogéneas de la población.

de movilidad poblacional de las personas en reincorporación a la vida civil. De acuerdo a los datos arrojados y a los análisis de la información de naturaleza etnográfica devenida de la labor en campo, se hace la calificación a criterio de experto.

En el caso del antiguo ETCR Los Monos, se realizaron 83 encuestas con las que se caracterizaron, en parte de la misma a 328 personas. Esta caracterización se hizo sobre las siguientes variables: Género, Edad, Nivel de escolaridad, Tipo de afiliación, Discapacidad y Actividad productiva principal. Las demás variables referentes a las proyecciones de permanencia de la familia, la pertenencia a agrupaciones, organizaciones y otras y el conocimiento sobre la gestión del riesgo y las formas organizativas presentes en el territorio, sólo aplican para la persona que contestó. En este sentido de acuerdo a la pregunta, el universo de la muestra es 328 o 80.

Es importante resaltar que dentro de la estructura poblacional de los habitantes del antiguo ETCR, se encuentran pocos jóvenes en edad escolar, por ello los indicadores se direccionan de manera importante a la sociodemografía de población joven y adulta (de 15 años en adelante).

A continuación, se exponen los factores, las categorías y los indicadores de análisis de la vulnerabilidad social:

#### **14.1.1. Fragilidades socioeconómicas**

La fragilidad social fue analizada a partir de las categorías escolaridad, cobertura en salud y enfoque diferencial, mientras que la fragilidad económica se define a través de las categorías ingresos adicionales, enfoque diferencial económico y proyectos productivos activos (Figura 194).

El factor social de la fragilidad se ubica en una escala intermedia, la categoría más crítica es la escolaridad como se puede evidenciar en el Figura 194. Si bien hace parte de los programas bandera y compromisos a desarrollar frente a los acuerdos, dentro de los antiguos ETCR, sólo el 22,7 % de las personas mayores de 17 años han terminado la secundaria, 25,7 % la dejó inconclusa, en otras palabras, el 51 % de las personas en estas edades están desescolarizadas, en un grado de la primaria o con esta culminada.

La dimensión educativa se complejiza cuando además se trata de una población indígena que, a pesar de su participación en el conflicto armado, sigue guardando sus valores identitarios y formas de entender la vida, aspectos invisibilizados por el sistema educativo tradicional, que termina por generar procesos

Tabla 90: Esquema elementos para establecer la vulnerabilidad

<b>FACTOR DE VULNERABILIDAD</b>	<b>CATEGORIA</b>	<b>INDICADORES (preguntas de encuesta)</b>
Fragilidad Social	Cobertura en salud	Personas con cobertura en salud
	Escolaridad	Personas de 17 años en adelante con secundaria completa
		Personas de 17 años en adelante con secundaria incompleta
	Enfoque diferencial	Personas en condición de discapacidad
		Personas con jefatura única del hogar
Mujeres con jefatura única del hogar sin ingresos adicionales		
Fragilidad Económica	Ingresos adicionales a la renta básica otorgada por el gobierno	Familias sin ingresos adicionales a la renta básica
	Enfoque diferencial económico	Mujeres sin ingresos adicionales a la renta básica/Hombres sin ingresos adicionales a la renta
	Proyectos productivos activos	Proyectos productivos activos
Capacidad Organizativa	Organización para la participación	Formas asociativas (proyectos, cooperativas, comités, colectivos, asociaciones, entre otras) presentes en el antiguo ETCR
		Personas que pertenecen a organizaciones, colectivos, comités, y otras agrupaciones
Capacidad de gestión y cooperación	Confianza en actores locales	Personas que confían cuando tienen una dificultad en las organizaciones del antiguo ETCR
	Participación del antiguo ETCR a nivel local	Participación de los representantes del antiguo ETCR en instancias de decisión y/o planificación a nivel local
		Conocimiento y participación en la GRD
	Alianzas y cooperación	Personas que participan en organizaciones para la GRD
Capacidad de apropiación	Permanencia y expectativas de crecimiento del antiguo ETCR	Alianzas establecidas por el antiguo ETCR
		Personas que se proyectan viviendo en el antiguo ETCR
		Personas que creen que sus familias vivirán con ellos en el antiguo ETCR

Tabla 91: Escala de valoración

<i>CATEGORÍA</i>	<i>CALIFICACIÓN CUALITATIVA</i>
Escolaridad	Alta
Cobertura en salud	Baja
Enfoque diferencial social	Media
Ingresos adicionales	Baja
Enfoque diferencial económico	Media
Proyectos productivos activos	Baja

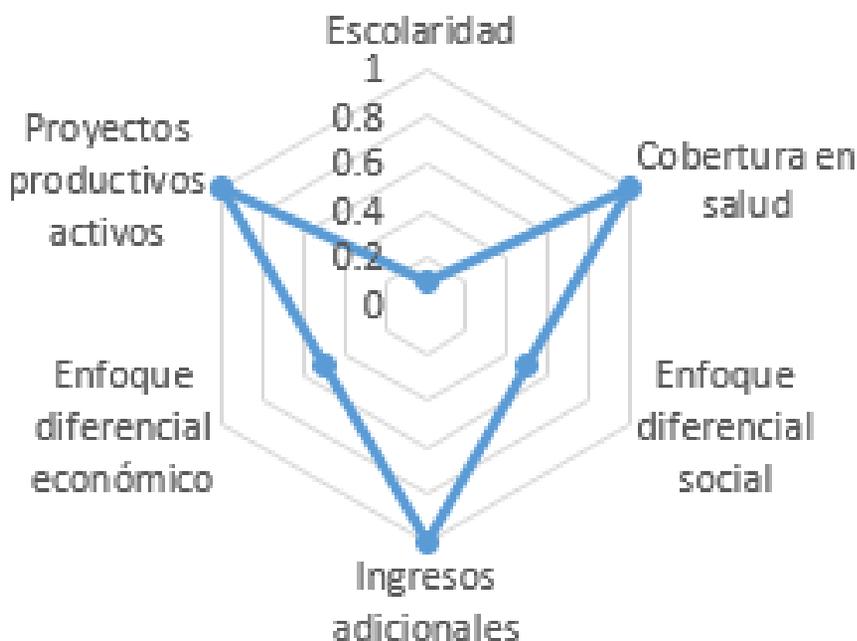


Figura 194: Fragilidad social y económica antiguo ETCR

de deserción escolar. Es importante, aclarar que el 88 % de los excombatientes se identifican como indígenas.

Dentro de este factor, la categoría salud es la mejor posicionada, el 100 % de los encuestados manifiestan estar dentro de algún régimen de salud. La mayoría de ellos en el régimen subsidiado: AIC EPSI (Asociación Indígena del Cauca. Empresa Prestadora de Salud Indígena).

Con fragilidad media, aparece la categoría enfoque diferencial, donde se establecen tres medidas: la presencia de personas en condición de discapacidad, el porcentaje de jefaturas únicas y mujeres con jefaturas únicas de hogar sin ingresos adicionales.

La población discapacitada, presenta un porcentaje de 4,7 %, mayor al del país que es de 4,07 % y muy superior al del municipio, de 1,0 %. Se debe decir que las discapacidades motoras y de visión, son las más evidentes, derivadas de

los combates, frente a los encuestados es una condición medianamente significativa.

Por su parte, las jefaturas únicas y las jefaturas de mujeres sin ingresos adicionales, son variables relativas, y que quizás en un contexto donde gran parte de la población es indígena, no tiene el mismo sentido (frente a poblaciones de origen mestizo). El 40 % de las personas que contestaron, expresan tener jefaturas únicas de hogar y el 15 % de estas son mujeres.

Aunque las preguntas relacionadas con las jefaturas se contestaron, se debe decir que, en estas como en otras preguntas, se evidencian sesgos importantes derivados principalmente de limitantes en el proceso de comunicación con los encuestados, por lo que la calificación deviene en mayor medida de la observación realizada en campo y de las entrevistas que se pudieron efectuar.

La categoría ingresos adicionales da cuenta en el contexto sociopolítico de la reincorporación, de esas posibilidades que tiene y/o buscan las personas en dicha situación para mejorar su acceso a recursos, que en ocasiones se supedita a la renta básica que el gobierno nacional les debe garantizar por un determinado tiempo como parte de los acuerdos.

En este sentido, se puede establecer que la fragilidad frente a los roles en la familia es media, porque si bien, en general quienes toman las decisiones son los hombres, todos deben trabajar desde pequeños para la manutención del hogar, es decir, que no existe de manera diferenciada las jefaturas únicas y de mujeres sin ingresos adicionales. Se evidencia una intrincada red de parentelas, por las que hay redistribución de alimentos y un control importante de los aspectos públicos y privados por parte del gobierno del territorio (indígena y/o antiguo ETCR), que “garantizaría” de algún modo el acceso a los recursos básicos. Aun así, aspectos que pueden ser percibidos como resilientes frente a los desastres, las emergencias e incluso la generación de escenarios de riesgo, están amenazados por las violencias que se ejercen sobre las mujeres, los jóvenes que quieren otros estilos de vida, además de todas las externalidades que presionan su subsistencia como población indígena.

De acuerdo con esto, el 63 % de la población caracterizada, mayor de 14 años, realiza actividades económicas adicionales, especialmente dentro de la actividad agrícola, en parcelas familiares o como jornaleros y jornaleras, el 37 % restante son estudiantes, amas de casa o no tienen una ocupación.

La fragilidad económica, tiene como su variable más representativa, de mediana fragilidad, el enfoque diferencial económico, se hace evidente, aunque

todos (hombres y mujeres), tienen acceso a la tierra y a la producción de alimentos en sus parcelas, que son las mujeres las que menos acceden a otro tipo de ingresos adicionales a la renta básica: trabajo en oficina, como jornaleras u en la realización de labores diferentes a la agricultura. En este caso son el 24 %, de las personas mayores de 14 años con ingresos adicionales.

Respecto a los proyectos productivos activos, la fragilidad es baja, por lo señalado anteriormente, todos tienen acceso a tierra para trabajar, obtener su alimentación y además comercializar y, por otro lado, este antiguo ETCR mantiene activos y produciendo más de 4 proyectos productivos, aún no con rentabilidad que mejore la economía de los hogares de los habitantes de su territorio, pero si produciendo y gestionando recursos para fortalecerlos. Proyectan obtener ganancias para ser distribuidas entre los socios de los diferentes proyectos en 5 años. Cuentan, además, con un sistema de administración de los proyectos formalizado a través de una cooperativa, y un compromiso evidente de los socios (excombatientes), en las actividades de los proyectos y en el aporte que deben realizar.

Por esto la fragilidad socioeconómica, ante el riesgo de desastres es media, el sentido de vida colectivo, conectado con la naturaleza y con el territorio como el soporte vital de dicha forma de vida, puede contribuir a una conciencia mayor sobre la generación del riesgo y por tanto sobre el cuidado y uso racional de los recursos y los servicios ambientales, también puede influir en mayores controles del territorio frente a procesos humanos invasivos y degradantes del medio ambiente. Sin embargo, es necesario mejorar los niveles de escolaridad, con el propósito de que haya una mejor comprensión y concienciación de procesos que implican el relacionamiento con otros actores a nivel local y regional, sin que ello implique el abandono de las diferencias y de una educación en dicho sentido.

Se debe también mejorar y fortalecer las intervenciones para aminorar las brechas de género, que rompen y contradicen el vínculo cultural ancestral, minimizando un aporte vital como el que hacen las mujeres en la generación de prácticas respetuosas y sostenibles con el territorio.

#### **14.1.2. Capacidades sociales**

Las capacidades en el antiguo ETCR Carlos Perdomo (Los Monos), se observaron a través de tres factores: capacidades organizativas, capacidades de gestión y cooperación y capacidades de apropiación (Figura 195).



Figura 195: Capacidades antiguo ETCR

Las capacidades organizativas tienen una representividad importante, son calificadas como altas, especialmente por el nivel de organización y liderazgos de las actividades económicas y sociales del antiguo ETCR.

Se debe decir que la dirigencia de este, ha llegado a una articulación efectiva con organizaciones al interior de la población indígena, la cual impele el cumplimiento de compromisos de parte y parte, como la participación de muchos de las personas reincorporadas en la máxima instancia de organización indígena, existente en el resguardo San Lorenzo de Caldon, el cabildo. Pero, además, tanto la dirigencia indígena como la del antiguo ETCR deben participar en

Tabla 92: Escala de valoración

CATEGORÍA	CALIFICACIÓN CUALITATIVA
Organizaciones sociales	Alta
Participación	Alta
Confianza en actores locales	Alta
Participación ant. ETCR a nivel local	Media
Conocimiento y participación en la GRD	Baja
Alianzas y cooperación	Alta
Permanencia en el antiguo ETCR	Alta
Expectativas de crecimiento	Alta

las asambleas de junta de Acción comunal de la vereda Santa Rosa donde esta parte del resguardo mencionado y por ende el antiguo ETCR. Otra expresión de esta capacidad es que a cada uno de los proyectos productivos se articularon otras personas del territorio, no necesariamente en proceso de reincorporación, es decir, indígenas y campesinos de la zona.

Con respecto a la gestión del riesgo estas capacidades amplifican de manera importante la resiliencia de la población del antiguo ETCR, crea condiciones para generar procesos de conocimiento y reducción del riesgo, además de relacionamiento para la preparación de la respuesta a eventos extremos.

Cuentan con una cooperativa denominada: “COOPERATIVA MULTIACTIVA ECOMÚN ESPERANZA DEL PUEBLO”, con por lo menos 6 proyectos o programas funcionando, además de las organizaciones de base que se articulan y en las cuales participa la mayoría: JAC Santa Rosa, Cabildo San Lorenzo de Caldon, entre otras. Por su parte el 100 % de las personas encuestadas manifiestan que alguien de su familia pertenece a al menos una organización social y/o económica, el 94 %, además expresa confiar en las organizaciones internas del antiguo ETCR: partido FARC, dirigencia del antiguo ETCR, Cabildo y Cooperativa.

Las capacidades de cooperación y gestión, concibe categorías de análisis, posicionadas en una escala intermedia, porque, aunque hay una organización y gestión del relacionamiento local, municipal y regional que se puede considerar exitoso, el conocimiento en general de la población y la articulación con organizaciones de la gestión del riesgo de desastres es incipiente, lo que debe mejorar para potencializar las demás capacidades. Sólo el 3 % de los encuestados conocen alguna organización local de GRD.

Frente a estas capacidades se debe resaltar las alianzas con organizaciones internacionales que han devenido en el aumento de conocimiento del territorio, capacidades instaladas para la gestión y obtención de recursos para mejoras de los proyectos productivos. Algunas organizaciones mencionadas fueron ONU, PNUD, Universidad Javeriana de Cali, entre otros, aliados que también pueden hacer transferencia de conocimiento en el campo de la Gestión del Riesgo de Desastres.

La capacidad de apropiación, vista desde categorías tales como: permanencia en el antiguo ETCR y expectativas de crecimiento, es representativa, se considera como una capacidad alta, por aspectos especialmente culturales, en palabras de los pobladores indígenas, ellos no tienen muchas posibilidades de

salir y vivir en otros contextos, por lo que sus expectativas de vida como la de sus familias, son en general respecto a su lugar de origen y es que se debe decir que la mayoría de las personas en reincorporación de este antiguo ETCR, son de la zona incluso viven temporalmente en la actualidad con sus familias de nacimiento. En este sentido el crecimiento que se espera es un crecimiento natural, endógeno que replique sus patrones de ocupación. El 79 % de los encuestados expresaron que son originarios de la zona y que por tanto se proyectan viviendo en el antiguo ETCR, sólo una persona manifiesta no proyectarse.

Esta capacidad incide, entonces, si es orientada, en la forma en la que habitarán la zona, el sentido que tendrá el asentamiento y los niveles de cohesión social que permitirán implementar procesos de direccionamiento y seguimiento a su consolidación.

## 14.2. Vulnerabilidad física

En el presente capítulo se determina la vulnerabilidad de las estructuras ubicadas en el antiguo ETCR Los Monos bajo los distintos eventos de amenaza considerados en el proyecto (movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales). Esto, con el propósito de cuantificar los daños esperados o pérdidas económicas de las estructuras actuales como efecto de la posible materialización de las amenazas evaluadas en los capítulos 12, 13. Como insumo en la estimación del riesgo y planificación territorial (Merz, Kreibich, Schwarze, y Thieken, 2010). Para la evaluación de la vulnerabilidad física se han desarrollado distintas metodologías, tales como, modelos con enfoque cualitativo, cuantitativo, semi-cuantitativo, matrices de riesgo (e.g. Frédéric, Asté, y Leroi, 1996; Kaynia y cols., 2008; Reichenbach, Galli, Cardinali, Guzzetti, y Ardizzone, 2005).

En el presente proyecto se aborda la vulnerabilidad bajo un enfoque cuantitativo a partir de la vulnerabilidad física, la cual es definida como el grado de pérdida debido al daño físico de estructuras y edificaciones (UNDP, 2004). A continuación, se presentan la metodología y resultados correspondientes a la vulnerabilidad física únicamente para movimientos en masa, ya que en el espacio territorial no se identifican corrientes que interactúen directamente con las estructuras en el antiguo ETCR, por ende no se presenta vulnerabilidad por inundaciones y avenidas torrenciales, acorde con lo mencionado en el capítulo 13.

### 14.2.1. Vulnerabilidad por Movimientos en masa

Para el análisis de la vulnerabilidad por movimientos en masa se implementa la metodología propuesta por Du, Yin, Nadim, y Lacasse (2013, 2014), la cual se fundamenta en metodologías propuestas por Uzielli y cols. (2008) y Li, Nadim, Huang, Uzielli, y Lacasse (2010), igualmente se consideran las recomendaciones de la Guía del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2016). El modelo empleado define la vulnerabilidad física en función de la intensidad del movimiento en masa y la fragilidad de los elementos expuestos. Los parámetros se establecen a partir de los mecanismos de impacto del movimiento en masa y las categorías asignadas a los elementos vulnerables. Con base en lo anterior el modelo físico propone la siguiente ecuación para el cálculo de vulnerabilidad:

$$V = \begin{cases} \frac{1}{2} \left( \frac{I}{1-S} \right)^2 & \text{si } I \leq 1-S \\ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{1-I}{S} \right)^2 & \text{si } I > 1-S \end{cases} \quad (14.1)$$

$V$  = Vulnerabilidad de los elementos expuestos a la amenaza

$I$  = Intensidad del movimiento en masa

$S$  = Fragilidad del elemento expuesto

Los valores de vulnerabilidad se encuentran en una escala de 0 a 1. Para estructuras; 1 representa la destrucción completa de la estructura, valores menores que 1 indican el grado de afectación (daño) y valores de 0 representan que la edificación no presenta ningún daño. el modelo de Du y cols. (2014) contempla la magnitud del evento mediante el factor intensidad, el cual considera un rango entre 0 y 1, donde valores de 1 significan que el movimiento en masa tiene un alto potencial de destrucción. Mientras que, los elementos expuestos son definidos mediante la fragilidad dado por indicadores según las características intrínsecas de la estructura, oscilando entre valores de 0 y 1, siendo 0 una resistencia alta al impacto.

#### 14.2.1.1. Fragilidad

El término de fragilidad se entiende como la respuesta de los elementos expuestos frente a la interacción de los movimientos en masa con dichos elementos. En bienes materiales, esta respuesta depende de las características del elemento expuesto, y en personas, de la capacidad de respuesta y la posición relativa con respecto al área afectada por el evento (SGC, 2016).

Para el cálculo de la fragilidad de edificaciones ( $S_e$ ) se siguió la metodología establecida por el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2016), la cual considera los estudios propuestos por Li y cols. (2010) y Du y cols. (2013, 2014). Para el cálculo de la fragilidad de las edificaciones se consideran cuatro indicadores: tipo de estructura ( $S_{tip}$ ), altura ( $S_{alt}$ ), conservación ( $S_{con}$ ) y edad ( $S_{ed}$ ). Mediante estos parámetros se calcula la fragilidad ( $S_e$ ) usando la ecuación 14.2 (SGC, 2016).

$$S_e = 1 - (1 - S_{tip})(1 - S_{alt})(1 - S_{con})(1 - S_{ed}) \tag{14.2}$$

A continuación, se describen cada uno de los indicadores contemplados en el cálculo de la fragilidad de estructuras:

Factor de fragilidad por tipo de estructura ( $S_{tip}$ ): Este factor hace referencia a los componentes con los que está construida la estructura. Para esto se consideran los factores de resistencia propuestas por Du y cols. (2013) basado en las tipologías establecidas por Heinimann (1999) (ver Tabla 93).

Tabla 93: Factores de fragilidad por tipología de estructuras

TIPOLOGÍA		FRAGILIDAD	$S_{tip}$
F	Construcciones simples	Muy Alta	1,0
E	Estructuras ligeras	Alta	0,9
D	Estructuras con confinamiento deficiente	Media	0,7
C	Mampostería reforzada	Baja	0,5
B	Edificaciones reforzadas	Muy baja	0,30
A	Edificaciones con reforzamiento especial	Extremadamente baja	0,10

Factor de fragilidad por altura de la estructura ( $S_{alt}$ ): Este Factor se encuentra en función del número de pisos del que está compuesta la estructura. Para el cálculo de este factor se toma como base el estudio de Li y cols. (2010) , modificado a las tendencias constructivas del país (ver Tabla 94).

Tabla 94: Factor de fragilidad por altura de la edificación

TIPOLOGÍA	NÚMERO DE PISOS	$S_{alt}$
E,F	$\geq 2$	0,9
D	$\geq 4$	0,9
D	2 y 3	0,6
Demás tipologías y alturas		0,05

Factor de fragilidad por conservación de la estructura ( $S_{con}$ ): El estado de conservación se asigna de manera subjetiva haciendo una evaluación visual y cualitativa del estado de la estructura, las cuales serán posteriormente expuesta

al evento de movimiento en masa. La calificación se da siguiendo los lineamientos propuestos por Du y cols. (2013, 2014) (ver Tabla 95).

Tabla 95: Factores de fragilidad por estado de conservación de la edificación

ESTADO DE CONSERVACIÓN	DESCRIPCIÓN	SEPARACION GRIETAS(mm)	$S_{con}$
Muy bueno	No se observan deformaciones, agrietamientos o envejecimiento.	0	0,00
Bueno	Solo se observan daños superficiales leves en los acabados.	0-0,5	0,05
Deformaciones leves	Fisuras en juntas horizontales en los extremos superior e inferior de elementos verticales.	0,5-1,0	0,25
Deformaciones medias	Desplazamiento relativo o movimiento en el plano fuera de él (pandeo).	1,0-5,0	0,50
Deformaciones graves	Inclinaciones del elemento fuera de su plano vertical.	5,0-10,0	0,75
Deformaciones muy graves	Unidades de mampostería con fallas por aplastamiento. Concreto con fallas por aplastamiento.	10	1,00

Factor de fragilidad por edad de la estructura ( $S_{ed}$ ): El cálculo de este factor se realiza mediante la relación de los años de servicio de la estructura con respecto a la vida útil de la misma. Mediante el resultado de esta relación se logra determinar el valor de la fragilidad por edad de la estructura (ver Tabla 96).

Tabla 96: Factor de fragilidad por edad de la edificación

RELACION AÑOS DE SERVICIO/VIDA ÚTIL	$S_{ed}$
$\leq 0,1$	0,05
0,1-0,4	0,10
0,4-0,6	0,30
0,6-0,8	0,50
0,8-1,0	0,70
1,0-1,2	0,80
$> 1,2$	1,00

El cálculo del valor de vida útil se puede determinar en función del tipo de edificación (ver Tabla 97).

Tabla 97: Vida útil en función del tipo de edificación

TIPOLOGÍA	VIDA ÚTIL
A y B	50 años
C y D	30 años
E	15 años
F	1-2 años

El actual asentamiento del antiguo ETCR Los Monos en Caldon, Cauca,

presenta una extensión de 4,5 hectáreas y contempla 60 módulos de alojamiento. Las áreas comunes con la que cuenta este antiguo ETCR son enfermería, Biblioteca y Áreas de recreación. Además, cuenta con servicios básicos como la Planta de tratamiento de agua Potable (PTAP) , 4 Pozos sépticos con capacidad de 2,000 Lts y 5,000 Lts , conexión eléctrica, suministro de gas y recolección de residuos solidos (ARN, 2020)

Actualmente los módulos de vivienda (Figura 196), se encuentran dispuestos a manera de “galpones” en habitaciones de uso privado por persona de 6 x 4 metros, cada módulo está compuesto de estructura de acero y tejas de fibrocemento, dividido internamente de perfilería en aluminio con paneles de drywall a una sola cara (Barreto, 2019). Además, cada módulo cuenta con batería sanitaria de dimensiones 1,00x1,60x1,10 metros, donde se tiene el servicio de ducha, baño y lavadero para cada 5 personas (ARN, 2020).

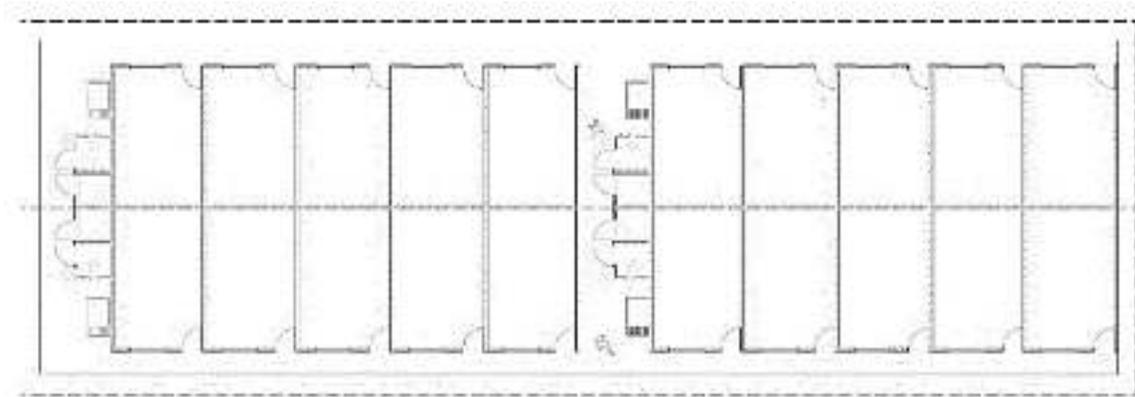


Figura 196: Planos módulos actuales de vivienda "Galpones", (Barreto, 2019)

Durante las visitas en campo se obtuvo el inventario de las estructuras construidas en el espacio de asentamiento, identificando las dimensiones y características del material en que se encuentran construidos y la funcionalidad que aportan a las familias asentadas. Es de resaltar que las estructuras presentes en el predio generalmente corresponden a estructuras ligeras según la metodología empleada.

Con base en el levantamiento de las viviendas en campo, se realiza una caracterización de estas estructuras en función de los indicadores necesarios para obtener la fragilidad de las estructuras. En la Tabla 98 se presentan los valores empleados para las tipologías comunes identificadas y sus correspondientes factores. Con respecto al factor  $S_{tip}$  se considera que las viviendas en su mayoría están hechas de acero, fibrocemento, aluminio y drywall, por lo tanto se optó

clasificar estas viviendas como estructuras ligeras; la PTAP cuentan con una estructura con mampostería reforzada; la sala de confección es una estructuras con confinamiento deficiente (ver Figura 197).

Tabla 98: Factores de fragilidad de las estructuras.

Construcción	$S_{tip}$	$S_{alt}$	$S_{con}$	$S_{ed}$	Fragilidad ( $S_e$ )
Módulos	0,90	0,90	0,05	0,10	0,991
Sala Confección	0,70	0,60	0,05	0,10	0,897
PTAP	0,50	0,05	0,05	0,10	0,594
Puesto Salud	0,90	0,90	0,25	0,10	0,993



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 197: Estructuras encontradas en el antiguo ETCR. (a) PTAP, (b) Sala Confección, (c) Puesto Salud, (d) Modulo Vivienda

Para el estado de conservación de las estructuras ( $S_{con}$ ), se estableció un estado de mantenimiento en general con deformaciones leves, exceptuando algunos elementos como la Sala de Confección y PTAP con una conservación buena. En el inventario se pudo establecer que todos los tipos de edificaciones reportadas en el antiguo ETCR fueron construidas solo de un piso de altura, además para la asignación de esta calificación se tuvo en cuenta el tipo de estructura. Para el factor de edad ( $S_{ed}$ ) de las edificaciones, los años de servicio de las viviendas según información suministrada por la comunidad son de 3,5 años, y la vida

útil se estima según el tipo de estructura entre 15 y 30 años.

Con base en los resultados (ver Tabla 98), se observa que el mayor valor de fragilidad está asociado al Puesto de Salud, con un valor de 0,993. Por otro lado, los Módulos, la Sala de Confección, y la PTAP tuvieron valores de fragilidad de 0,991, 0,897, y 0,594, respectivamente. Siendo el valor de 0,594 el de menor valor de fragilidad. En general, los valores de fragilidad se presentan en rangos cercanos a 1 lo que implica según la ecuación 14.2 un escenario desfavorable en términos de la resistencia de los elementos expuestos ante un movimiento en masa. Los elementos expuestos responden favorablemente ante movimientos en masa cuando tienen asociados valores bajos de fragilidad, por consiguiente la resistencia es alta. Por otro lado, los elementos expuestos con valores de fragilidad cercanos a 1 o igual a 1 se encuentran en un escenario desfavorable, su resistencia es baja.

#### 14.2.1.2. Intensidad

La magnitud del evento se considera a partir de la intensidad descrita en la Ecuación 14.1, definida como la intensidad por movimientos en masa para deslizamientos rápidos ( $I_{rap}$ ), es decir, con alta velocidad de deformación. La valores de magnitud se establecen de acuerdo a la profundidad del deslizamiento y la presión del impacto, contemplando el aporte de cada intensidad mediante la Ecuación 14.3 (SGC, 2016).

$$I_{rap} = 1 - (1 - I_{f-pre}) * (1 - I_{f-prof}) \quad (14.3)$$

Donde:

$I_{rap}$  = Intensidad para deslizamientos rápidos

$I_{f-pre}$  = Parámetro de intensidad por presión del impacto

$I_{f-prof}$  = Parámetro de intensidad por profundidad del deslizamiento

La cuantificación y distribución de la presión de impacto y la profundidad de los movimientos en masa se determina con base a la propagación de estos eventos identificados zonas de amenaza alta a través del modelo *r.avaflow* con resolución espacial 0,5 m. Este modelo permite modelar estas zonas de falla como materiales sólidos que transitan sobre la topografía a partir de un balance de conservación de energía y de momento empleando la plasticidad de Mohr-Coulomb hasta que todo el material se ha depositado o abandona el área de estudio.

La magnitud de los probables eventos de movimientos en masa son asignados a cada elemento existente en el antiguo ETCR de Los Monos de la siguiente forma; en la Figura 198, se presentan los diferentes valores de presión y profundidad producto de la propagación de los movimientos en masa. Como se puede visualizar, cada elemento posee diferentes valores de presión y profundidad correspondientes; conociendo esto, se procede a seleccionar el máximo valor de presión ( $P_{max}$ ) y profundidad ( $H_{max}$ ) dentro de cada elemento expuesto, haciendo uso de la herramienta *Zonal Statistic* de Arcmap. Así es posible obtener la máxima magnitud de presión y profundidad para cada polígono dentro del antiguo ETCR.

Posterior a la asignación de la magnitud para cada polígono; se estima el parámetro de intensidad por presión del impacto ( $I_{f-pre}$ ) definido como la relación entre la presión del impacto causada por el deslizamiento ( $P_{max}$ ) y la presión límite de la estructura ( $P_{lim}$ ). Esta última se obtiene partir de la tipología de las estructuras definidas según los indicadores de fragilidad (ver Tabla 99). Obtenida la relación entre las variables mencionadas, se puede implementar la Tabla 100, la cual permite transformar cada tasa en el parámetro de intensidad por presión (SGC, 2016).

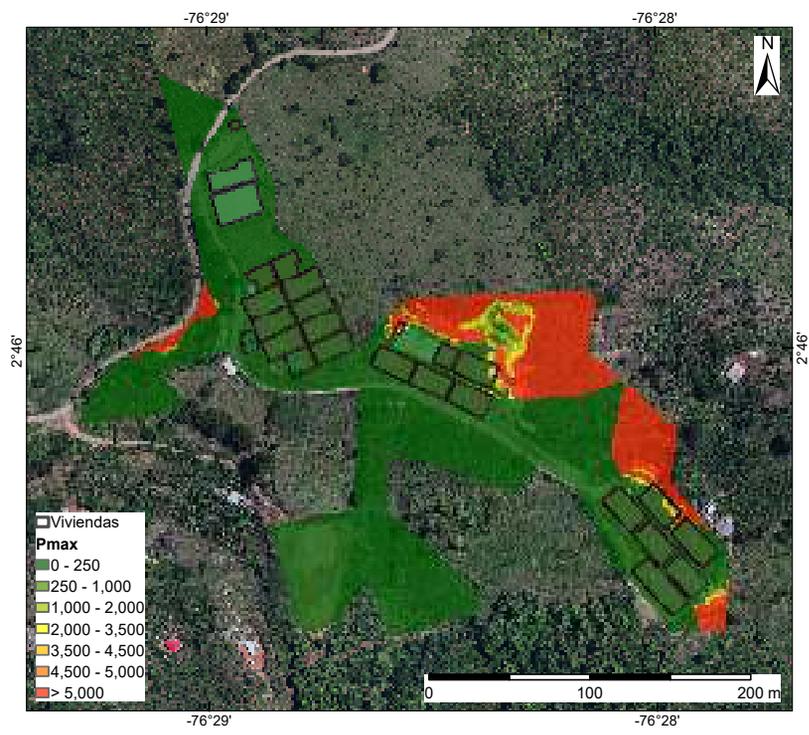
Tabla 99: Presión límite o de falla, según tipo de estructuras. Fuente:(SGC, 2016)

Tipología	$P_{lim}(Pa)$
Construcciones simples	1000
Estructuras ligeras	5000
Estructuras con confinamiento deficiente	8000
Mampostería reforzada	11000
Edificaciones reforzadas	18000
Edificaciones con reforzamiento especial	20000

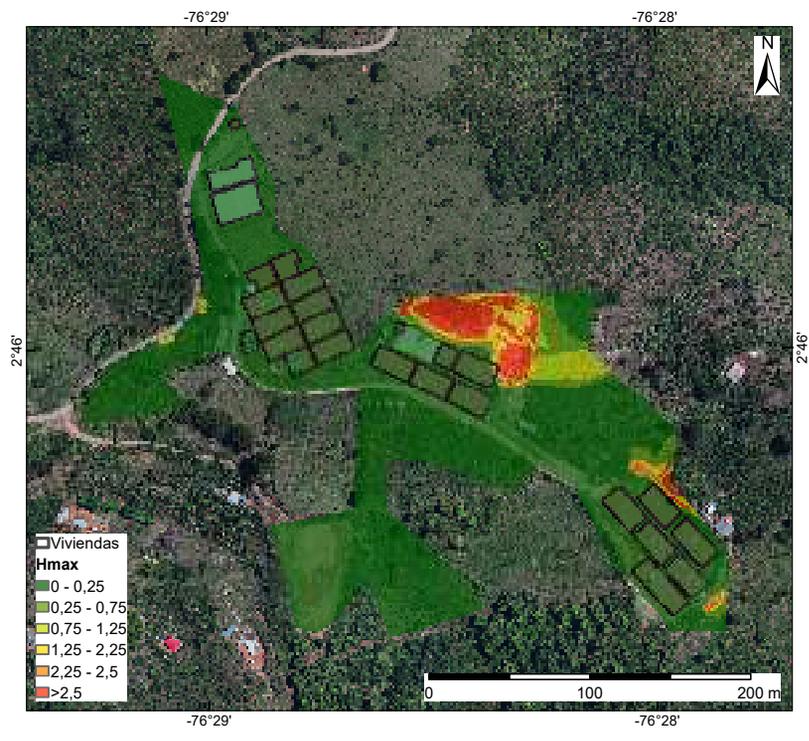
Tabla 100: Parámetro de intensidad por presión del impacto ( $I_{f-pre}$ ). Fuente:(SGC, 2016)

$P_{max} / P_{lim}$	$I_{f-pre}$
<0,1	0,05
0,1-0,2	0,2
0,2-0,4	0,4
0,4-0,7	0,7
0,7-1,0	0,9
$\geq 1,0$	1

Por otro lado, el parámetro de intensidad asociado a la profundidad del deslizamiento ( $I_{prof}$ ) se estima a partir de la relación entre la profundidad del



(a) Presión del impacto ( $P_{max}$ )



(b) Profundidad del depósito ( $H_{max}$ )

Figura 198: Mapas de propagación por movimientos en masa en el escenario actual del antiguo ETCR de Los Monos.

deslizamiento ( $H_{max}$ ) y la altura de las edificaciones, la cual se estima alrededor de 2,5m a partir de lo observado en las visitas de campo. Obtenido los valores de la relación se procede a implementar la Tabla 101, la cual asigna a cada relación el parámetro de intensidad asociado a la profundidad del movimiento en masa (SGC, 2016). Finalmente, se determina la intensidad mediante la Ecuación 14.3 que junto con la fragilidad de cada elemento se determina la vulnerabilidad física.

Tabla 101: Parámetro de intensidad según la profundidad del deslizamiento y la altura de las edificaciones. Fuente:SGC (2016)

$H_{max}$ / Altura edificación	$I_{f-prof}$
< 0,2	0,1
0,2-0,4	0,3
0,4-0,6	0,5
0,6-0,8	0,7
0,8-1,0	0,9
$\geq 1,0$	1

#### 14.2.1.3. Mapa de vulnerabilidad por movimientos en masa

En la Figura 199 se presenta el mapa de vulnerabilidad física de los elementos existentes en el asentamiento sujetos a la amenaza por movimientos en masa. El mapa de vulnerabilidad se presenta en las categorías alta, media y baja. Las cuales contemplan los posibles daños que se puedan generar por la materialización de la amenaza, atendiendo a la clasificación de vulnerabilidad recomendadas en la Guía del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2016). Las categorías se asignan de la siguiente manera:

- Alta: representa un colapso de la estructura (nivel de daño) y los valores de vulnerabilidad oscila entre 0,5 hasta 1,0.
- Media: nivel de daño grave y oscila entre valores de 0,10 y 0,5.
- Baja: agrupa los niveles de daño moderado y leve, y los valores oscilan entre 0,0 y 0,1.

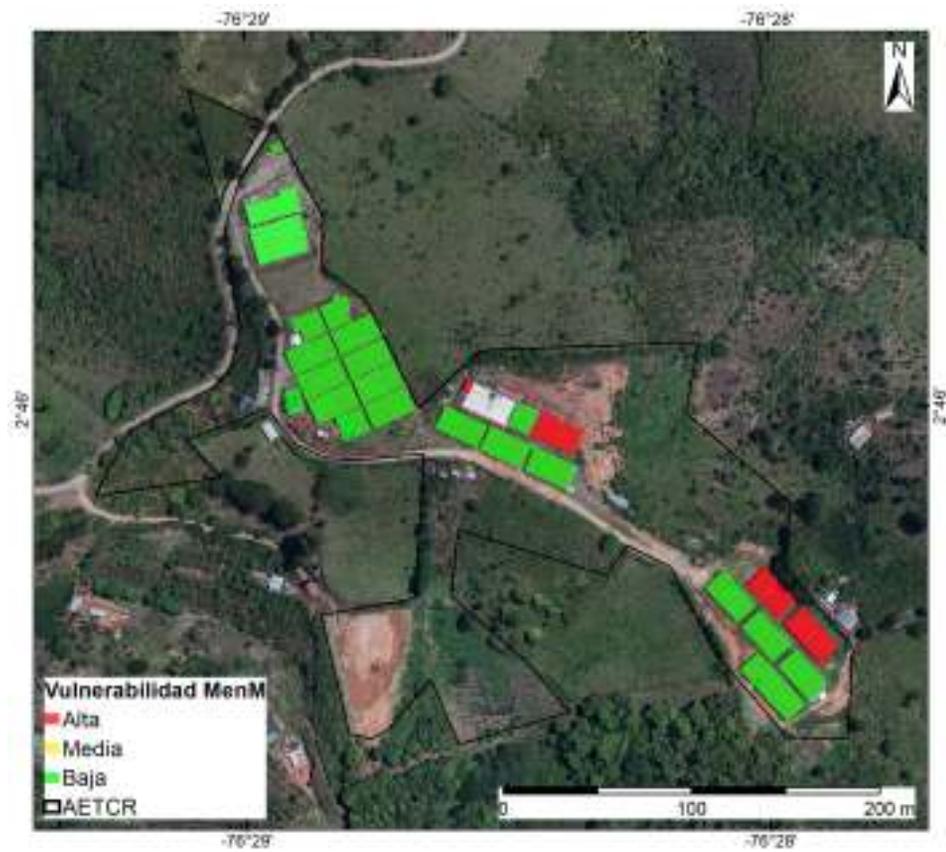


Figura 199: Vulnerabilidad por movimientos en masa en el escenario actual del antiguo ETCR de Los Monos

# Referencias

- ARN. (2020). *Aeter antioquia - llano grande*. Descargado de [http://www.reincorporacion.gov.co/es/reincorporacion/Paginas/ETCRs/AETCR\\_llano\\_grande.aspx](http://www.reincorporacion.gov.co/es/reincorporacion/Paginas/ETCRs/AETCR_llano_grande.aspx)
- Barreto, J. (2019). Ren-hacer hábitat para tejer la sociedad del posconflicto. *Pontificia Universidad Javeriana*.
- Crozier, M. J., y Glade, T. (2005). Landslide hazard and risk: issues, concepts and approach. *Landslide hazard and risk*, 1–40.
- Du, J., Yin, K., Lacasse, S., y Nadim, F. (2014). Quantitative vulnerability estimation of structures for individual landslide: application to the metropolitan area of san salvador, el salvador. *Electron J Geotech Eng*, 19, 1251–1264.
- Du, J., Yin, K., Nadim, F., y Lacasse, S. (2013). Quantitative vulnerability estimation for individual landslides. En *Proceedings of the 18th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering, paris* (pp. 2181–2184).
- Frédéric, L., Asté, J., y Leroi, E. (1996, 01). Vulnerability assessment of elements exposed to mass-movement: Working toward a better risk perception. En (p. 263 - 269).
- Heinimann, H. R. (1999). *Risikoanalyse bei gravitativen naturgefahren*. BUWAL, Dokumentation.
- Kaynia, A., Papathoma-Köhle, M., Neuhäuser, B., Ratzinger, K., Wenzel, H., y Medina-Cetina, Z. (2008). Probabilistic assessment of vulnerability to landslide: application to the village of lichtenstein, baden-württemberg, germany. *Engineering Geology*, 101(1-2), 33–48.
- 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.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., y Thielen, A. (2010). Assessment of economic flood damage. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 10(8), 1697–1724.
- Reichenbach, P., Galli, M., Cardinali, M., Guzzetti, F., y Ardizzone, F. (2005). Geomorphologic mapping to assess landslide risk: concepts, methods and applications in the umbria region of central italy. *Landslide Risk Assessment. John Wiley, Chichester*, 429–468.
- SGC, S. G. (2016). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Servicio Geológico Colombiano-SGC.
- UNDP, U. N. D. P. (2004). *Reducing disaster risk: A challenge for development a global report*. United Nations.
- UNGRD. (2017). Lineamientos para el análisis de la vulnerabilidad social en los estudios de la gestión municipal del riesgo de desastres.
- Uzielli, M., Nadim, F., Lacasse, S., y Kaynia, A. M. (2008). A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides. *Engineering Geology*, 102(3-4), 251–256.

## Capítulo 15

# Riesgo

En el presente capítulo se presenta la evaluación del riesgo cuantitativo asociado al evento amenazante de movimientos en masa. Con el propósito de establecer el riesgo generado por cada uno de los eventos se emplea el concepto de riesgo específico descrito en la Guía del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2016). El riesgo específico es definido por la Ecuación 15.1 y el riesgo total de cada elemento expuesto se considera como la suma de los riesgos específicos para todo tipo de evento (Ecuación 15.2).

$$R_s = P(H_i) * V * E \quad (15.1)$$

Donde:

- $R_s$  = riesgo específico o grado de pérdidas esperadas
- $P(H_i)$  = amenaza o probabilidad de ocurrencia
- $V$  = Vulnerabilidad del elemento expuesto
- $E$  = Costo económico del elemento expuesto en pesos (\$)

$$\sum R_t = R_{MenM} \quad (15.2)$$

Donde:

- $R_t$  = riesgo total
- $R_{MenM}$  = riesgo específico por movimientos en masa
- $P(H_i)$  = amenaza o probabilidad de ocurrencia

Las componentes de amenaza y vulnerabilidad contempladas en la cuantificación del riesgo son abordadas a partir de las metodologías descritas en los capítulos 12 y 14, respectivamente. A continuación, se presentan los resultados del riesgo específico y total para los elementos expuestos actuales en el antiguo ETCR Los Monos.

## 15.1. Riesgo actual

En cuanto a la componente de amenaza por movimientos en masa se considera la probabilidad espacial de las distintas categorías (alta, media y baja), a partir de la frecuencia relativa expresado en porcentaje que representa cada categoría (ver Figura 184). Esta probabilidad es asignada a cada elemento existente en el asentamiento actual considerando su ubicación espacial preservando la de mayor categoría. Adicionalmente, las celdas que expresan valores de intensidad en el análisis de propagación (ver Figura 198) se estiman como categoría de amenaza alta, y por ende se le asigna dicha probabilidad al polígono que probablemente este sujeta a la interacción con la masa de suelo deslizable.

En la Tabla 102 se presentan las probabilidades estimadas para cada categoría de amenaza por movimientos en masa.

Tabla 102: Probabilidad espacial de la amenaza por movimientos en masa

<i>Categoría</i>	<i>%</i>	<i>Probabilidad</i>
Baja	48.32	0.48320
Media	45.62	0.45622
Alta	6.06	0.06059

Por otra parte, la vulnerabilidad obedece al análisis descrito en la sección 14.2.1, en el cual se determinó cuantitativamente la probabilidad (0-1) de que se generen daños ante la ocurrencia de la amenaza. La última componente en la evaluación del riesgo contempla el valor monetario (costo) de los elementos expuestos. Este costo se contempla con base al valor monetario de los bienes considerados por la ARN, estipulado en la resolución 472 del 31 de Julio del 2018. El valor comercial aproximado de cada polígono existente en el antiguo ETCR Los Monos se estima de \$ 154.725.761.

La Tabla 103 presenta los resultados de las Pérdidas Esperadas Anuales (PEA) en pesos (\$) para algunas viviendas sujetas a movimientos en masa en el antiguo ETCR Los Monos. Los cuales se pueden identificar espacialmente haciendo uso del campo “Vivienda Expuesta” de la Tabla 103 y la Figura 200.

A partir de los resultados obtenidos, de todas las viviendas evaluadas (ver Figura 200), se identifica que 15 % de las viviendas expuestas en el escenario actual presentan afectaciones por movimientos en masa, expresadas en **\$ 37.499.335** de pesos en pérdidas esperadas anuales. Considerando que las viviendas expuestas presentan vulnerabilidad de 1, representando perdidas de colapso total de la estructura, lo cual asciende a pérdidas esperadas anuales de **\$ 9.374.834** para

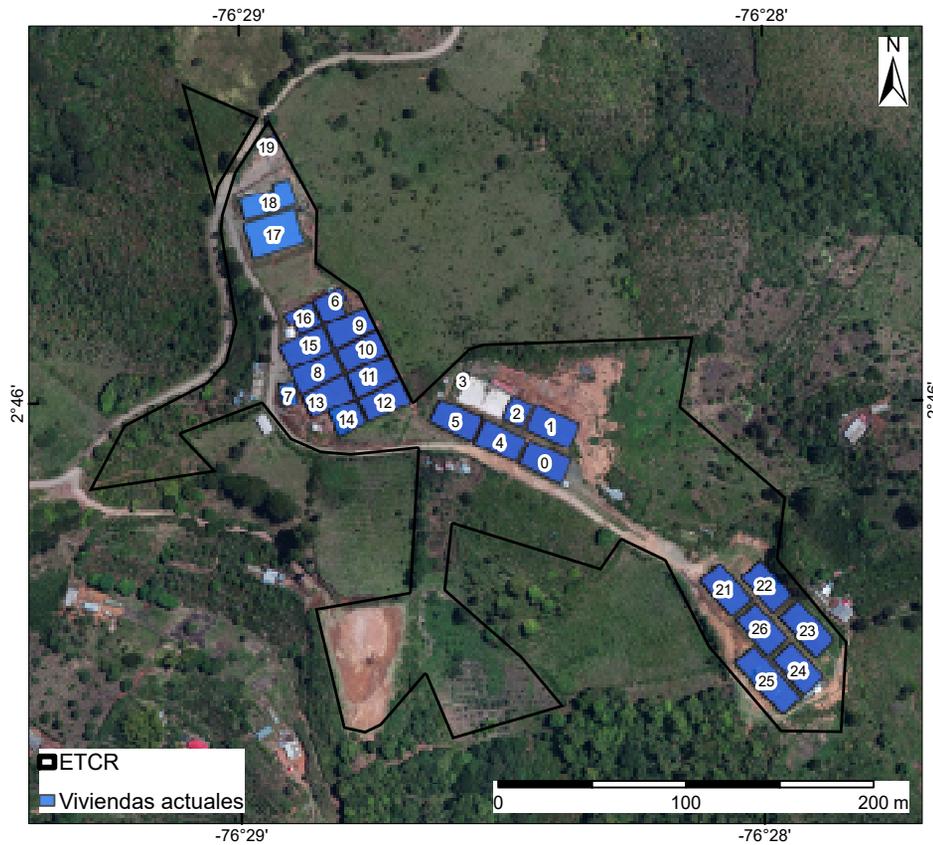


Figura 200: Elementos actuales dentro del antiguo ETCR Los Monos

Tabla 103: Pérdidas Esperadas Anuales (PEA) del escenario actual de algunas viviendas expuestas en el antiguo ETCR Los Monos

Viviendas Expuestas	PEA MenM (\$)	PEA Total (\$)
1	9.374.834	9.374.834
3	9.374.834	9.374.834
22	9.374.834	9.374.834
23	9.374.834	9.374.834

cada vivienda expuesta.

### 15.2. Riesgo prospectivo

Como parte de la viabilidad del proyecto de vivienda rural se pretende evaluar el riesgo de las viviendas proyectadas en el antiguo ETCR; siendo así importante definir una aproximación de ubicación espacial y considera las características de los prototipos de viviendas concebidas.

### 15.3. Esquema de aproximación espacial

Con el fin de obtener cantidades de obra ajustables al antiguo ETCR, se realiza un ejercicio de aproximación esquemática del espacio con estructuras básicas necesarias de acuerdo con las 216 familias priorizadas por la ARN para la adquisición de vivienda en este espacio.

Para la realización de este ejercicio se tuvo en cuenta el diseño de La Pradera, realizado por Taller Síntesis y la arquitecta Ana Elvira Vélez, con 50 viviendas sociales implantadas en Salgar, Antioquia que hacen parte del Proyecto para la reconstrucción de Salgar después de la avalancha en 2015. Estas viviendas de  $60 m^2$  tienen un lote de  $260 m^2$  que permite actividades propias de la ruralidad como pequeñas huertas y jardines. Teniendo en cuenta este proyecto y con el fin de generar el menor impacto ambiental, se plantea una vía principal que atraviesa el predio y caminos peatonales que distribuyen hacia las viviendas. Además bajo la conversación con la Dirección de Vivienda Rural y la propuesta de 6 tipologías de vivienda, se realiza el ejercicio básico de ubicación de vías, predios con su vivienda asociada y análisis de otras infraestructuras planteadas como la PTAP, PTAR, equipamientos recreativos y culturales.

El predio de Los Monos actualmente cuenta con  $44698,54 m^2$ , teniendo en cuenta las restricciones normativas y las zonas de amenaza alta para los tres eventos evaluados (movimiento en masa, avenidas torrenciales e inundación), surge un área efectiva de  $41565,73 m^2$  para localizar las infraestructuras futuras.

Para la implantación de las viviendas rurales y debido al espacio disponible se plantean predios de  $150 m^2$  con el fin de asegurar pequeñas huertas y jardines privados en cada predio.

En La Figura 201 se observa una posible distribución de los 216 predios necesarios. De los  $41565,73 m^2$  disponibles para implantar las estructuras futuras, se utilizan  $37963,52 m^2$  para viviendas y vías de acceso, resultando así un espacio disponible de  $3602,21 m^2$  para ubicar usos complementarios y espacio público.

En cada uno de estos espacios priorizados se tuvo en cuenta la menor categoría de amenaza, pendientes que faciliten la incorporación del proyecto y respetando las condiciones normativa se presenta en La Figura 202 la propuesta de unas viviendas tipo, implantadas en el centro de predio de conformación cuadrada. Se debe tener en cuenta que, dichas viviendas no corresponden a diseños definitivos y pueden variar a hora de ser ejecutadas tanto en posición como el tamaño acá considerado de  $55,8 m^2$ .

La ventaja de estos predios es que no cuentan con restricciones normativas

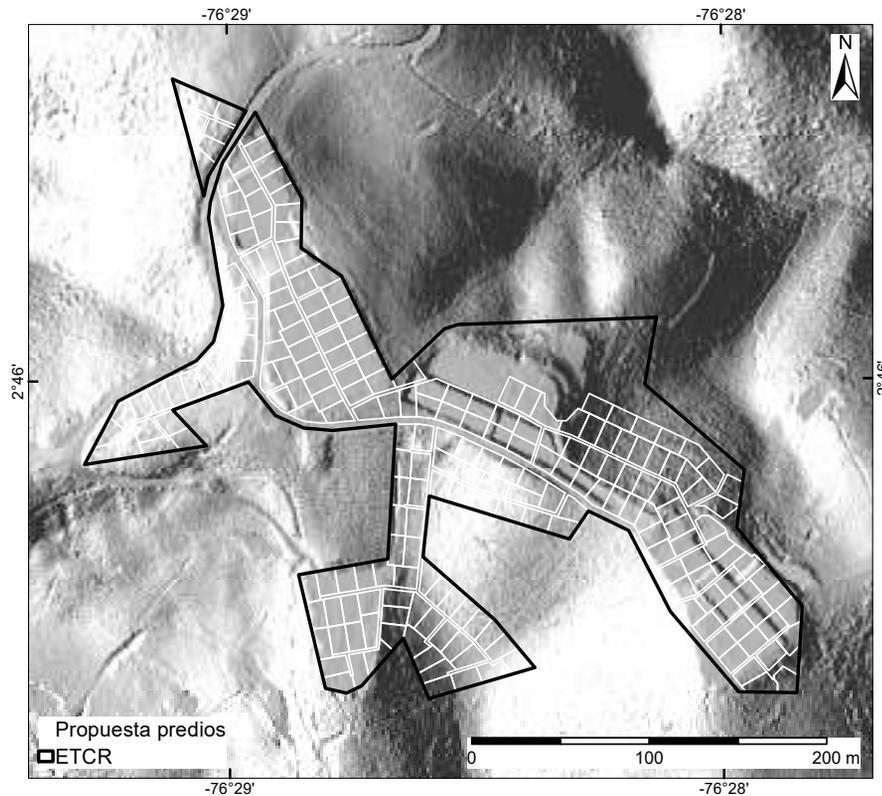


Figura 201: Propuesta predios para viviendas

que dificulte la distribución y además no presenta fenómenos de inundación y avenidas torrenciales; el único tipo de evento es por movimientos en masa que tal como se vio en el capítulo de amenaza por movimientos en masa su inestabilidad está principalmente en las laderas de sus linderos donde se analizó la estabilidad en detalle para de igual forma reconocer obras de remediación y por ende tener un riesgo mitigable. Las pocas zonas en amenaza alta dentro de él no se usaron para esta propuesta actual de distribución.

### 15.3.1. Prototipo vivienda rural

La tipología para las viviendas proyectadas corresponden a mampostería reforzada, este tipo de edificaciones tienen un sistema estructural de mampostería con elementos de refuerzo (barras, láminas, pernos, platinas, etc.). Las viviendas para los modelos prototipo están constituidas por una estructura de concreto que comprenden casi aproximadamente el 50% del total de los elementos que componen el inmueble, además, muros en mampostería, carpintería metálica, instalaciones hidráulicas, instalaciones sanitarias, instalaciones eléctricas, acabados, sistema de post-tratamiento prefabricado, y cubierta (ver Figura 203).

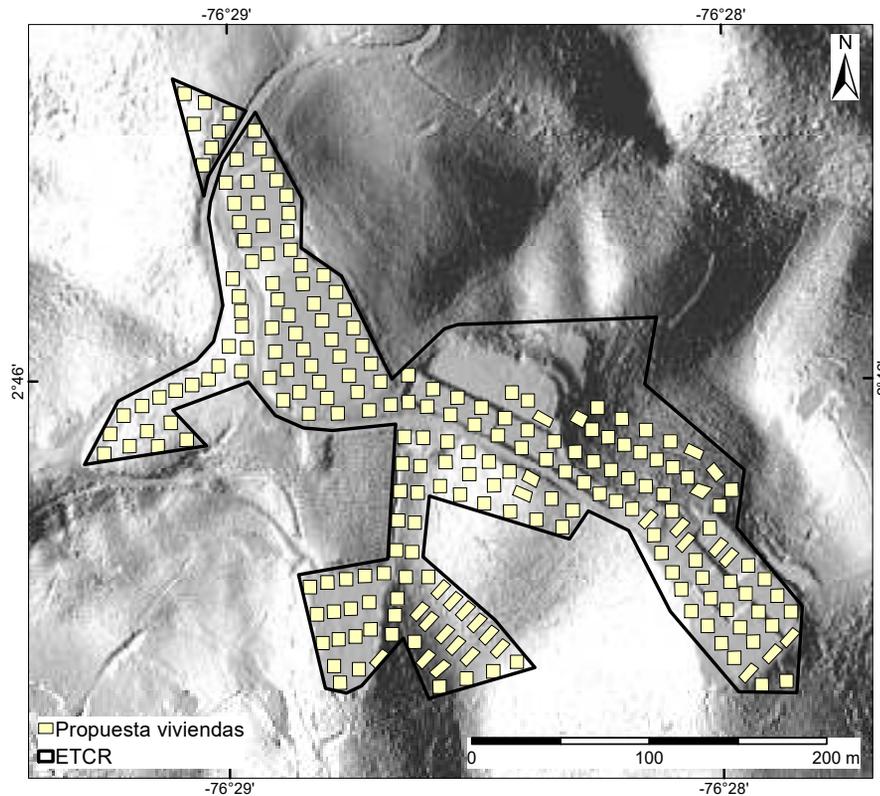


Figura 202: Viviendas guías

Los prototipos de vivienda comprenden un área de entre  $52,8$  y  $55,55m^2$ . El valor económico de cada vivienda se estima en \$ 38.995.699.



Figura 203: Prototipo vivienda rural proyectada

### 15.3.1.1. Evaluación de riesgo prospectivo

A partir de las características tipológicas y materiales proyectados para la construcción de las viviendas permanentes se establece la fragilidad para la cuantificación de la vulnerabilidad por movimientos en masa. La metodología empleada es descrita en la sección 14.2.1.1.

En términos de los indicadores establecidos en la fragilidad; la variable  $S_{tip}$  se toma con un valor de 0,5 asociado a una tipología estructural de mampos-

tería reforzada. Para la variable  $S_{alt}$  se obtuvo un valor de 0,05 en relación a estructuras de un solo piso. A la variable  $S_{con}$  se le asignó un valor de 0 que representa un estado de conservación muy bueno, acorde con el hecho de que las viviendas serán construidas. Por otro lado, la variable  $S_{ed}$  se presenta como el cociente de la relación de años de servicio con su vida útil, que para el escenario que se propone se va a tener una relación de años de servicio de 0 debido a que las viviendas apenas entrarían en funcionamiento, y que bajo la tipología de mampostería reforzada tendrían una vida útil de 30 años, dando así un valor final de cero para la variable  $S_{ed}$ . El valor de fragilidad final es de 0,525 un valor que se encuentra entre la mitad del rango (0 – 1) y que propone una respuesta de los elementos expuestos ante movimientos en masa aceptable con respecto a su resistencia (ver Tabla 104). Todos los valores presentados anteriormente se tomaron bajo el mismo criterio para las 225 viviendas que se tienen en consideración.

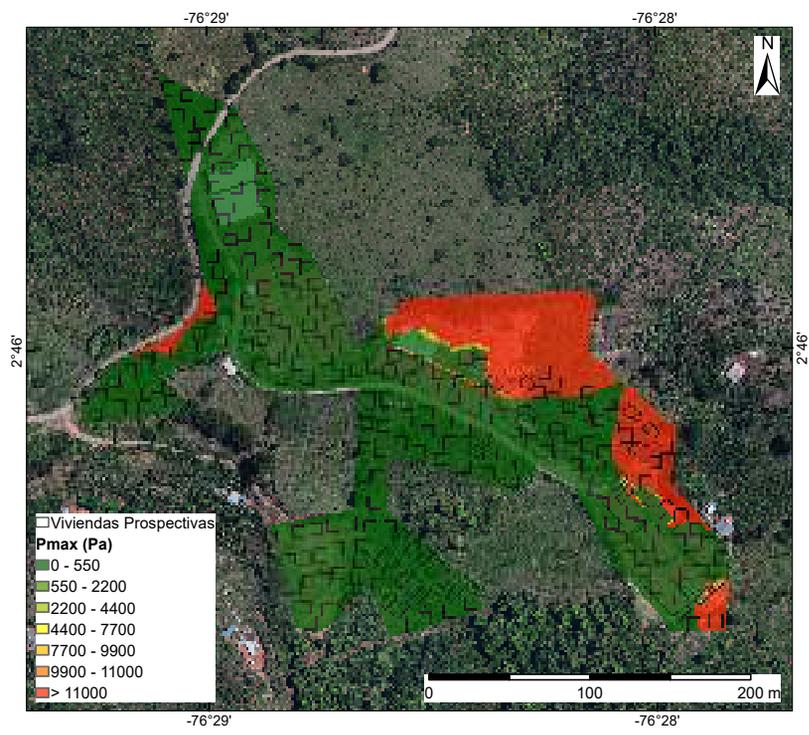
Tabla 104: Factores de fragilidad de las estructuras.

Construcción	$S_{tip}$	$S_{alt}$	$S_{con}$	$S_{ed}$	Fragilidad ( $S_e$ )
Vivienda	0,5	0,05	0	0	0,525

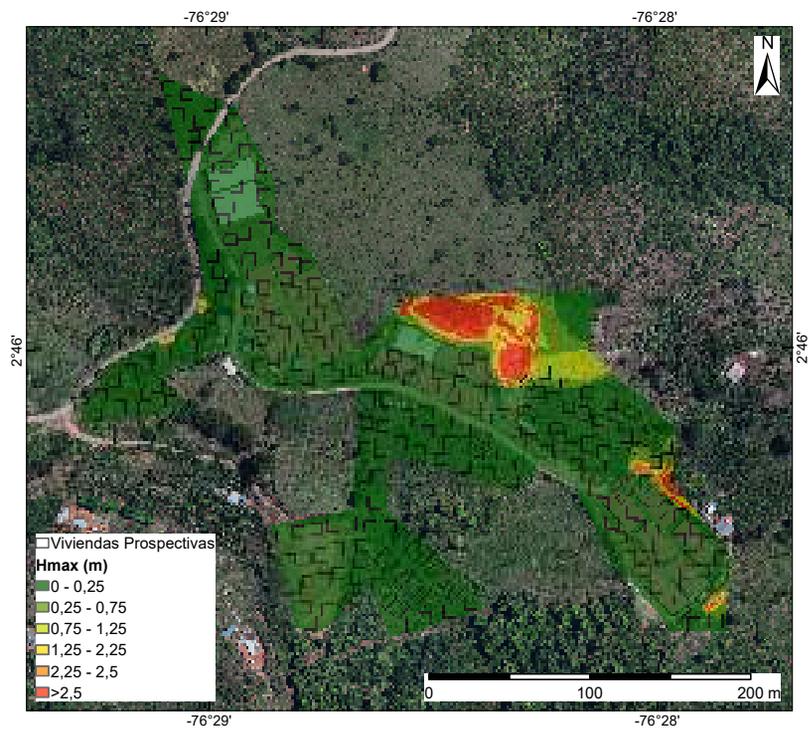
En cuanto a las componentes de amenaza y vulnerabilidad para el riesgo prospectivo de las viviendas proyectadas se consideran la misma metodología empleada en la sección de riesgo actual (sección 15.1). La amenaza evaluada corresponde a los valores descritos en la Tabla 102.

Con respecto a la vulnerabilidad; en la Figura 204 se presentan la intensidad por movimientos en masa con relación a la presión máxima y profundidad del depósito a interactuar con las viviendas. La Figura 204a presenta el mapa de presión con valor máximo de 11000 Pa correspondiente a la presión límite acorde a la tipología. Mientras que en la Figura 204b presenta los valores de profundidad considerando una intensidad alta con un valor igual o superior a la altura estimada de 2,5m para las viviendas proyectadas. El mapa de vulnerabilidad física de los elementos prospectivos por eventos de movimientos en masa se presenta en la Figura 205.

Finalmente, como ejercicio preliminar a las viviendas proyectadas se estima el riesgo específico por movimientos en masa, así como el riesgo total para cada vivienda en el antiguo ETCR Los Monos. En la Tabla 105 se presenta los riesgos económicos (pesos - \$) asociados a la posible exposición de algunas viviendas según la ubicación preliminar de las viviendas, las cuales son identificadas es-



(a) Presión del impacto ( $P_{max}$ )



(b) Profundidad del depósito ( $H_{max}$ )

Figura 204: Mapas de propagación por movimientos en masa, escenario proyectado en el antiguo ETCR Los Monos.

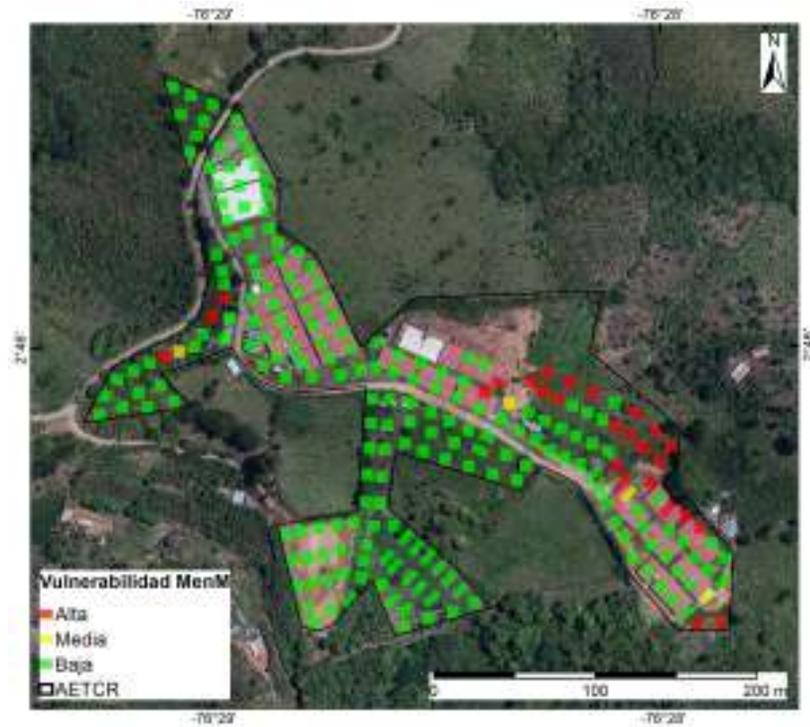


Figura 205: Vulnerabilidad por movimientos en masa de viviendas proyectadas en el antiguo ETCR Los Monos

parcialmente en la Figura 206.

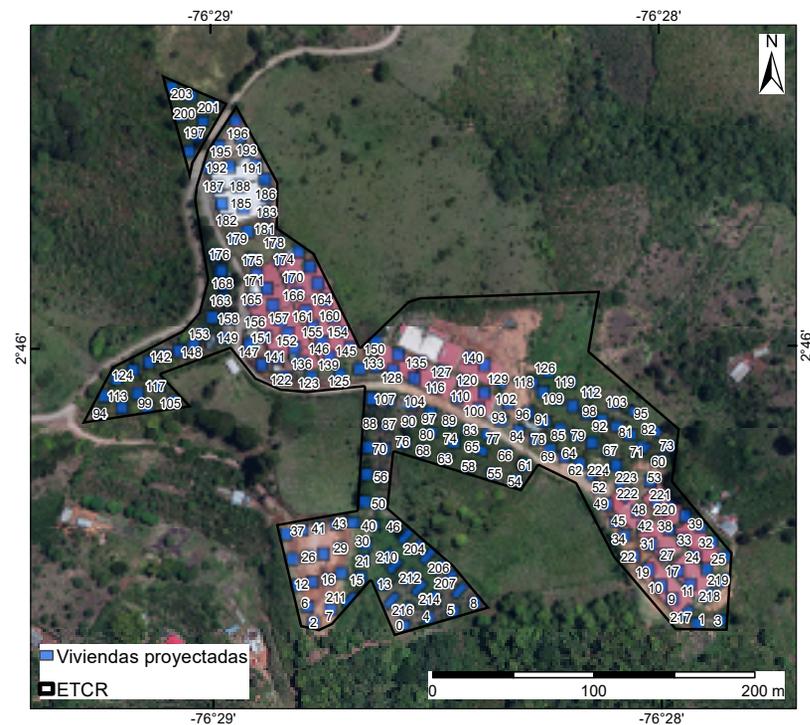


Figura 206: Viviendas proyectadas dentro del antiguo ETCR Los Monos

Tabla 105: Pérdidas Esperadas Anuales (PEA) del escenario proyectado de algunas viviendas expuestas en el antiguo ETCR Los Monos

Viviendas Expuestas	PEA MenM (\$)	PEA Total (\$)
142	2.050.287	2.050.287
223	2.328.031	2.328.031
60	2.362.749	2.362.749
82	2.362.749	2.362.749

A partir de los resultados obtenidos, de todas las viviendas proyectadas evaluadas (ver Figura 206), se identifica que el 13,3% de las viviendas expuestas podrían presentar afectaciones por movimientos en masa, que representa un total de **\$ 64.271.712** pérdidas esperadas anuales.

Al comparar el escenario actual y proyectado, se puede evidenciar que hay una reducción en la cantidad de viviendas expuestas que son afectadas en el escenario proyectado. No obstante, los costos asociados a las pérdidas esperadas anuales son mayores en el riesgo prospectivo. Cabe destacar, que la escala comparativa entre el escenario actual y prospectivo difiere en el número de viviendas ubicadas en el espacio territorial, se evalúan 27 y 225 viviendas para el escenario actual y prospectivo, respectivamente. Igualmente, se debe contemplar la diferencia del valor comercial aproximado de las viviendas proyectadas y actuales, representado por los materiales empleados y costos asociados a las probables pérdidas esperadas anuales.

#### 15.4. Riesgo socioeconómico

El riesgo, entendido como el daño que se puede generar cuando se materializa una amenaza, depende en gran medida de la capacidad de daño y de las fragilidad o situaciones propias a las personas y bienes que están expuestos o localizados en el área de daño. En términos generales, el riesgo es un sistema, localiza geográficamente, que se configura por la amenaza, las fragilidades y las capacidades.

A partir de la comprensión anterior, se definió la evaluación de la amenaza a partir de la matriz de riesgo, instrumento en el cual se expresa la interacción de la amenaza, a partir de su presencia y potencial de daño, con las fragilidades de los elementos del sistema, pero también de las capacidades de ese mismo sistema para evitar, contrarrestar o recuperarse de tal daño. Los valores de la matriz parten de evaluaciones cuantitativas, pero avanzan a la calificación, para dicha

interacción, por expertos con el conocimiento de los elementos que constituyen tal interacción, tanto teórica como empíricamente, es decir, el conocimiento a partir del trabajo en terreno.

Si bien, para dar cumplimiento a lo exigido como pre factibilidad para la construcción del proyecto de vivienda solo se requieren los estudios de amenaza, dada la experiencia del equipo se decidió aportar este elemento de análisis de riesgo ya que es este análisis el que permite anticiparse a prácticas antrópicas que posteriormente pueden convertirse en detonante de las amenazas. Es decir, este análisis integral permite una mirada de más largo plazo en la configuración de asentamientos humanos.

La evaluación de riesgo para el antiguo ETCR Los Monos tomando como referencia los siguientes valores, mostrados en la Tabla 106, permite evidenciarse que en términos generales el riesgo es de medio a bajo, siendo el motivo de gestión directa los factores amenazantes de movimientos en masa e inundaciones; pues aunque solo en el caso de los movimientos en masa la probabilidad de ocurrencia amerita tenerse en cuenta y el potencial de daño es baja por la localización de las vivienda proyectadas; es importante tener presente que las fragilidades de la población y las bajas capacidades de gestión y cooperación pueden incidir en el aumento de los riesgos.

Tabla 106: Evaluación del riesgo

Rangos para valoración del riesgo			
0-3	3, 1-5, 9	6-8, 9	9-11, 9
Bajo	Medio	Medio-alto	Alto

### 15.4.1. Matriz de riesgo

Amenaza	Probabilidad de ocurrencia de la amenaza en el sitio de estudio	Amenaza					Vulnerabilidad					Nivel de Riesgo					
		Amenaza					Vulnerabilidad										
		Alta	Medio	Baja	Alta	Medio	Baja	Alta	Medio	Baja							
MOVIMIENTOS EN MASA	0,4	0,5	2,4	2,7	0,5	2,2	2,7	2,3	0,8	0,9	2,2	0	0,0	0	0,0	0,2	2,7
INUNDACIONES	0,1	0	2,2	2,2	0,5	2,2	2	2,5	0,8	0,9	2,2	0	0,0	0	0,0	0	0,0
AVANZADA TORRENTINES	0	0	0	0,4	0	0,7	3,4	3,2	0,0	0,4	0,7	0	0,0	0	0,0	0	0,0

Figura 207: Nivel de riesgo

En conclusión, si bien las amenazas en el predio tienen escaso potencial de

daño al localizar adecuadamente las viviendas y demás elementos del poblado, es importante fortalecer a partir de medidas no estructurales las capacidades de gestión del riesgo de los habitantes y evitar así que prácticas culturales actuales se conviertan en detonantes y amplificadores de las amenazas.

# Referencias

SGC, S. G. (2016). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Servicio Geológico Colombiano-SGC.

## Capítulo 16

# Medidas de mitigación y remediación

El Artículo 20 del Decreto N°1807 del 2014 establece que se deben plantear medidas de intervención que podrán ser estructurales y no estructurales con la intención de prevenir, mitigar y/o reducir la amenaza y/o vulnerabilidad de los elementos expuestos. Por lo que se exponen medidas estructurales y no estructurales para su implementación en el antiguo ETCR.

### 16.1. Medidas no estructurales

Acorde con el Decreto 1077 del 2015 “*Determinación de medidas de intervención. Con base en los resultados de los estudios básicos, se deben determinar las medidas de mitigación no estructurales orientadas a establecer el modelo de ocupación del territorio y las restricciones o condicionamientos para el uso del suelo cuando sea viable, mediante la determinación de normas urbanísticas*” se determina las medidas de mitigación no estructurales orientadas a establecer el modelo de ocupación del territorio y las restricciones para el uso del suelo. Además, en el Artículo 20 (medidas de intervención) menciona que las medidas no estructurales son aquellas orientadas a regular el uso, la ocupación y el aprovechamiento del suelo, sistemas de alertas tempranas, socialización y apropiación cultural de los principios de responsabilidad y precaución.

Las implementaciones de las medidas no estructurales ayudan a la máxima reducción del riesgo, especialmente la pérdida de vidas. Por ello, las medidas no estructurales buscan la reducción de la vulnerabilidad de la población en riesgo a partir del planeamiento y la gestión llevados a cabo antes, durante y después de un evento. Las medidas no estructurales son de especial importancia para que en conjunto con las medidas estructurales se pueda mitigar el riesgo de una manera efectiva y balanceada.

Las dos medidas no estructurales fundamentales corresponden a la inclusión

de los presentes estudios en el Plan de Ordenamiento Territorial, y que permite que no se conformen condiciones de riesgo en el área, Adicionalmente el alcance del presente estudio incluye los Estudios de detalle, los cuales también deberán ser incorporados.

Como segunda medida fundamental, complementaria al POT, se refiere a la implementación de sistemas de alerta temprana (SAT) que permitan monitorear y hacer un seguimiento al desarrollo de eventos hidrometeorológicos que puedan generar una condición de riesgo para los pobladores. Para esto se presenta en el presente capítulo la definición de umbrales de lluvia críticos, y que podrán ser implementados para la construcción de un SAT.

Además, a continuación, se presentan otra serie de medidas no estructurales para las zonas de amenaza media y alta zonificadas en el capítulo 13 y 12. Así, de acuerdo con las condiciones locales y resultados del presente estudio se propone las siguientes medidas según el tipo de evento:

#### Movimiento en Masa:

- Con base en artículo 35 de ley 388 de 1997, se recomienda que las zonas de amenaza alta cuyo riesgo no pueda ser mitigado a través de obras estructurales sean clasificadas como suelos de protección.
- Implementación de estudios y puesta en marcha de proyectos forestales para la estabilización de laderas y control de erosión.
- Creación de programas de educación sobre buenas prácticas agrícolas y ganaderas en ladera.
- Atención y control de la tala de individuos arbóreos.
- Restringir los proyectos urbanísticos proyectados a futuro dentro de las zonas de amenaza media y alta si no es posible reducir o mitigar el riesgo asociado.

#### Inundaciones:

- Creación del plan de manejo y ordenamiento de cuencas hidrográficas (POMCA), con el fin de estudiar los cambios hidrológicos y con esto, las variaciones del cauce.
- Establecer estrategias para el control y manejo de inundaciones

- Implementación de planes de mantenimiento y limpieza de los cauces.
- Establecer estrategias para prácticas agrícolas que puedan actuar como control de erosión en las laderas, lo cual permite disminuir la carga de sedimentos de los cauces.
- Establecer Sistema de monitoreo permanente relacionado con los niveles del cauce en cuestión. Asociado a esto, implementar un sistema de alerta temprana el cual permita notificar a la comunidad cuando los niveles presenten un riesgo para ellos.
- Concientizar a la comunidad a través de capacitaciones, el riesgo que implica instalarse cerca al cauce. Además, resaltar en estas campañas los puntos de Amenaza alta y media a inundación.

### 16.1.1. Umbrales de lluvia

Un umbral de lluvia, es un nivel mínimo o máximo de una cierta cantidad de precipitación, después de lo cual se produce un proceso (Reichenbach, Cardinali, y De Vita, 1998). Los umbrales de lluvia buscan definir una cantidad de lluvia acumulada en cierto tiempo para la cual ocurren la mayor cantidad de eventos y de esta forma utilizarse para anticipar o pronosticar su ocurrencia. Según (Guzzetti, Peruccacci, y Rossi, 2007) los umbrales críticos de lluvia para predecir eventos de movimientos en masa se pueden hallar con dos metodologías:

- Métodos empíricos o estadísticos aplicados ampliamente a debido a su fácil implementación (Aristizábal, González, Montoya, y Vélez, 2011; Glade, 2000)
- Utilizando modelos físicos numéricos que son más complejos de definir y aplicar

La metodología para definir los umbrales es importante resaltar las siguientes definiciones. El término Lluvia Acumulada (LA), o lluvia a corto plazo, se refiere a la cantidad de lluvia caída en los días inmediatamente previos a la ocurrencia del evento; por otro lado, la Lluvia Acumulada Antecedente (LAA), o lluvia de largo plazo, representa la cantidad de lluvia acumulada en los días precedentes a los definidos como Lluvia Acumulada (LA) (Aristizábal y cols., 2011).

Luego de conocer cuales son las condiciones de lluvia en el área de estudio, se procede a calcular los datos de la Lluvia Acumulada y la Lluvia Acumulada

Antecedente para CHIRPS e IDEAM, a escala diaria para las estaciones del IDEAM y para CHIRPS, se evaluarán los umbrales a escala mensual, esto último se debe a que la correlación más alta entre los datos satelitales y del IDEAM se presenta a escala mensual, como se observa en la Figura 23.

#### **16.1.1.1. Umbrales de lluvia estaciones IDEAM escala diaria**

Para la definición de los umbrales de lluvia para las estaciones del IDEAM, se toman todos los datos disponibles de lluvia de las estaciones para luego comparar la lluvia acumulada de 1 día (mm) y la lluvia acumulada antecedente de 30 días (mm); de lo mencionado se tienen los siguientes resultados, mostrados en las Figuras 208, 209 y 210, se puede observar diferentes concentraciones al inicio mas densidad de puntos y secuencialmente se va perdiendo la densidad de los puntos, estas concentraciones que fueron marcadas en colores permiten conformar un sistema de alertas verde, amarilla, naranja y roja para la ocurrencia de eventos fuertes de lluvia y además de la lluvia que se ha venido acumulando que podrían ocasionar el desencadenamiento de procesos morfodinámicos.

Podemos observar en las gráficas que las zonas son definidas de la siguiente manera alerta verde (baja) para la estación La Aguada oscila entre 0 y 18 mm/día para lluvia acumulada y para lluvia acumulada antecedente 0 a 400 mm en 30 días de acumulado, para la estación Morales oscila entre 0 y 17 mm/día para lluvia acumulada y para lluvia acumulada antecedente 0 a 450 mm en 30 días de acumulado y para la estación Tunia, oscila entre 0 y 20 mm/día para lluvia acumulada y para lluvia acumulada antecedente 0 a 500 mm en 30 días de acumulado. En alerta media(amarillo) para la estación La Aguada oscila entre 18 y 30 mm/día para lluvia acumulada y para lluvia acumulada antecedente entre 400 y 550 mm en 30 días de acumulado, para la estación Morales oscila entre 17 y 40 mm/día para lluvia acumulada y para lluvia acumulada antecedente entre 450 y 600 mm en 30 días de acumulado, y para la estación Tunia oscila entre 20 y 40 mm/día para lluvia acumulada y para lluvia acumulada antecedente entre 500 y 600 mm en 30 días de acumulado. En alerta alta(naranja) para la estación La Aguada oscila entre 30 y 60 mm/día para lluvia acumulada y para lluvia acumulada antecedente valores superiores a 550mm en 30 días de acumulado, para la estación Morales oscila entre 40 y 65 mm/día para lluvia acumulada y para lluvia acumulada antecedente valores superiores a 600mm en 30 días de acumulado y para la estación Tunia oscila entre 40 y 60 mm/día para lluvia acumulada y para lluvia acumulada antecedente valores superiores

a 600mm en 30 días de acumulado, valores superiores a la zona naranja son clasificados como alerta muy alta(zona roja).

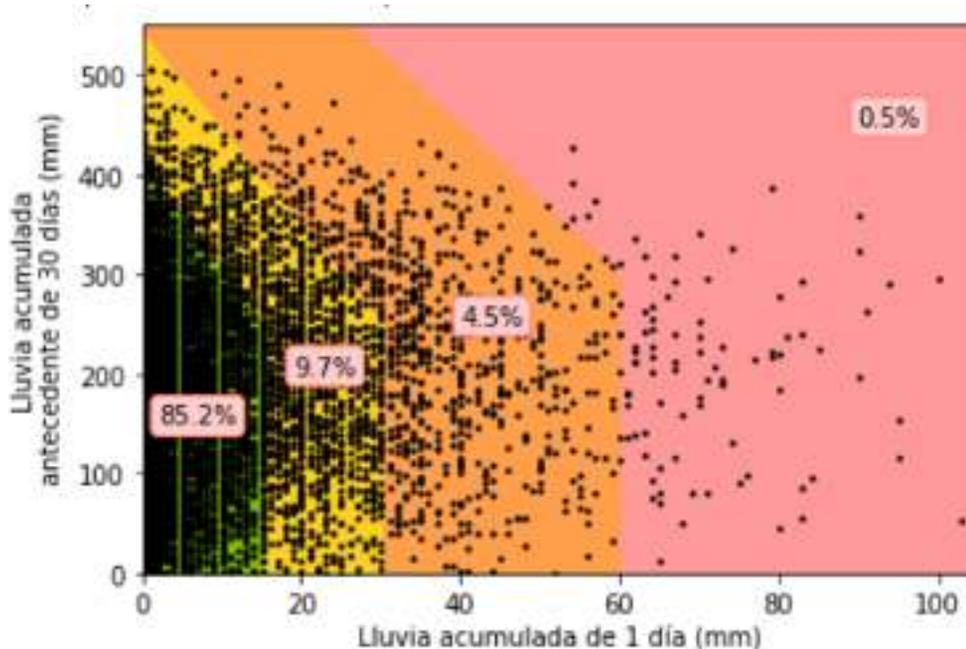


Figura 208: Umbral de lluvia estación La Aguada IDEAM

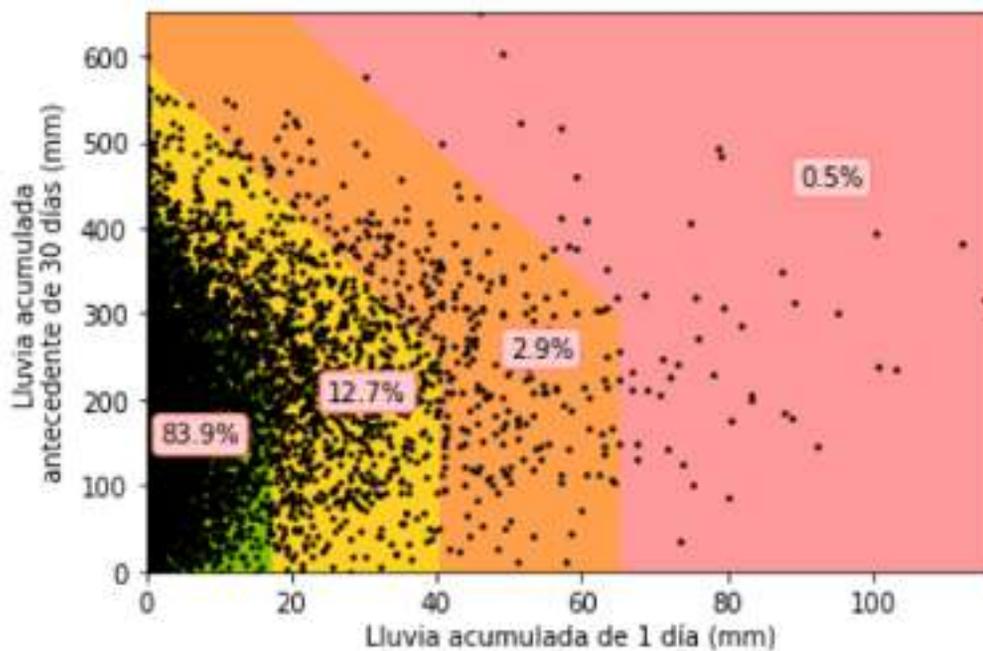


Figura 209: Umbral de lluvia estación Morales IDEAM

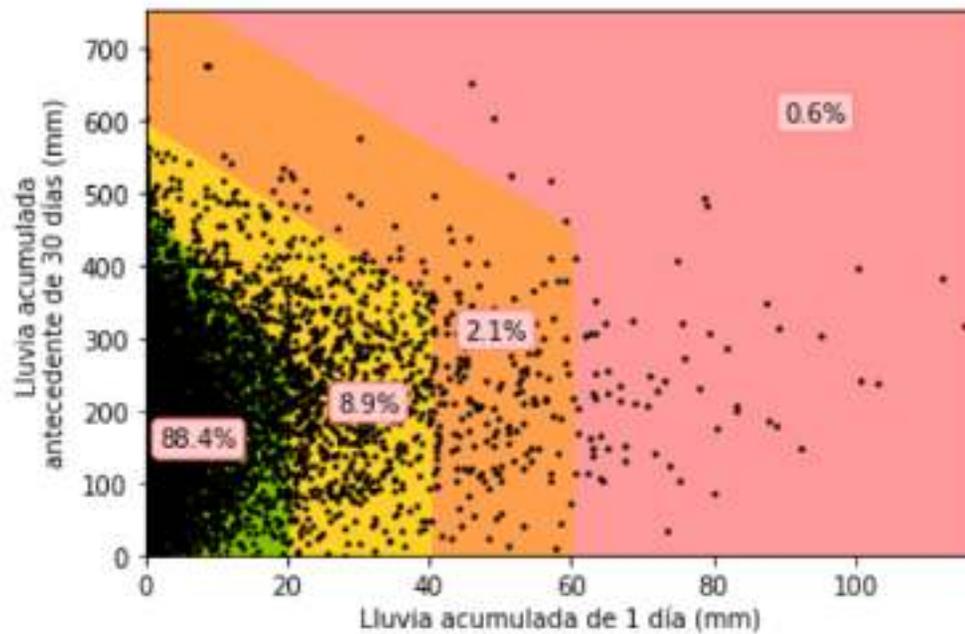


Figura 210: Umbral de lluvia estación Tunia IDEAM

### 16.1.1.2. Umbrales de lluvia como sistemas de alerta temprana (SAT)

Una de las medidas más efectivas para la reducción de las pérdidas asociadas a fenómenos naturales detonados por lluvias son los sistemas de alerta temprana (SAT) basados en umbrales empíricos de lluvia (Thiebes, 2016). Cuatro elementos se requieren para un SAT operacional: (i) una evaluación adecuada del riesgo, (ii) la implementación de monitoreo y modelos de predicción, (iii) una estrategia de diseminación de la información simple, sintética y confiable, y (iv) el desarrollo de estrategias de respuesta combinadas con educación y conocimiento en las comunidades (Canli, 2018).

De acuerdo con el análisis anterior se propone entonces el diseño e implementación de un sistema de alerta temprana, en el cual se puedan incorporar los umbrales planteados en el presente trabajo. Es importante recalcar que los numerales anteriores sólo corresponden a la definición de umbrales de lluvia críticos basados en la información disponible, y estos umbrales sólo corresponden a una parte de una sistema de alerta temprana. Se requiere un proceso de diseño riguroso bajo el liderazgo de una entidad contratada específicamente para tal fin, donde su implementación forme parte de un proceso de articulación interinstitucional en diferentes niveles de gobierno y con entidades técnicas idóneas en la materia, donde la comunidad forma parte integral en el construc-

ción e implementación del SAT.

Otro importante aspecto a considerar, es el nivel de incertidumbre que ofrecen los umbrales de lluvia; ya que en su definición existen múltiples fuentes de error. Entre las cuales se destaca: (i) la calidad de las bases de datos de lluvia y eventos utilizadas, (ii) la distribución espacial de la lluvia que no es considerada para las estaciones pluviométricas, otros posible factores condicionante so detonantes de los eventos, adicionales a la lluvia, entre otros.

Los umbrales de lluvia de las anteriores imágenes nos ayudan a identificar cuales son los niveles de precipitación mas altos que podrían desencadenar distintos fenómenos naturales como movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones. Como recomendación para la comunidad es importante tener en cuenta el monitoreo de la precipitación y verificar los limites de los umbrales (franja roja en las figuras anteriores de umbrales), si se da el caso de que en el registro de la precipitación sobrepasa el limite de los umbrales informar y alertar al consejo de gestión del riesgo del municipio sobre las condiciones de lluvia.

### **16.1.2. Estrategias para el aprovechamiento del suelo**

Teniendo en cuenta los estudios de detalle sobre la viabilidad normativa, surgen unas zonas disponibles para ser ocupadas, en las cuales se distinguen áreas edificables y no edificables que corresponde con el estudio de amenazas por inundación, movimientos en masas y avenidas torrenciales.

Se establecen tres (3) estrategias generales para la intervención de estas zonas enfocadas en la creación de espacio público, revegetación de superficies y la definición de zonas productivas, estas opciones se eligen según las condiciones de cada antiguo ETCR y se definen así:

- Espacios públicos, como complemento al uso de vivienda se definen espacios públicos que pueden ser libres u edificados según la categoría de riesgo. Para garantizar la no ocupación del suelo en vivienda en las altas pendientes, se recomienda plantear dichas zonas como espacios públicos aprovechables para el disfrute de la población.
- Revegetación, con el fin de proteger suelos no edificables, se plantea la revegetación como estrategia en suelos de amenaza alta principalmente. asegurando así que no se establezcan infraestructuras futuras en estos espacios.

- Zonas productivas, entendiendo la necesidad de establecer espacios para el desarrollo de proyectos productivos de la comunidad, se piensan zonas productivas que pueden ser exclusivamente de cultivos o complementados con infraestructura de apoyo, en áreas no afectadas por amenazas altas.

En este antiguo ETCR se definen como estrategias de mitigación zonas productivas y espacio público tanto libre como ocupado por equipamiento según el área donde se encuentre y las necesidades de la comunidad. La distribución del área en este espacio se observa en la Tabla 107.

Tabla 107: Áreas aprovechamiento del suelo

Descripción	Área $m^2$	Estrategia
Área bruta antiguo ETCR	44698,54	
Restricciones normativas	0	
Área neta antiguo ETCR	44698,54	
Edificable vivienda	37963,52	
Amenaza por mvto en masa alta	3132,81	espacio público libre
Espacio adicional edificable	3602,21	espacio público equipamientos
No edificable por altas pendientes	2228,51	zonas productivas

## 16.2. Medidas estructurales

Las medidas estructurales consisten en la construcción de obras con la intención de reducir y/o anular el impacto de las condiciones amenazantes sobre la población y las estructuras que constituyen el antiguo ETCR. En el estudio desarrollado se considera medidas estructurales básicas de protección y prevención en zonas de posible generación y/o propagación de movimientos en masa y manejo de aguas. A continuación se describen las obras recomendadas para su ejecución en diferentes puntos del antiguo ETCR, las cuales deben ser revisadas, ajustadas, evaluadas y ejecutadas por un profesional. Las obras de drenaje propuestas deben incluirse como parte del sistema de alcantarillado y manejo de aguas futuro del antiguo ETCR.

Las obras recomendadas son producto de las visitas de campo, los estudios y análisis hidrológicos y geotécnicos realizados. En la Figura 211, se dan a conocer las obras recomendadas para su ejecución y la ubicación del perfil que se especificara en cada obra.

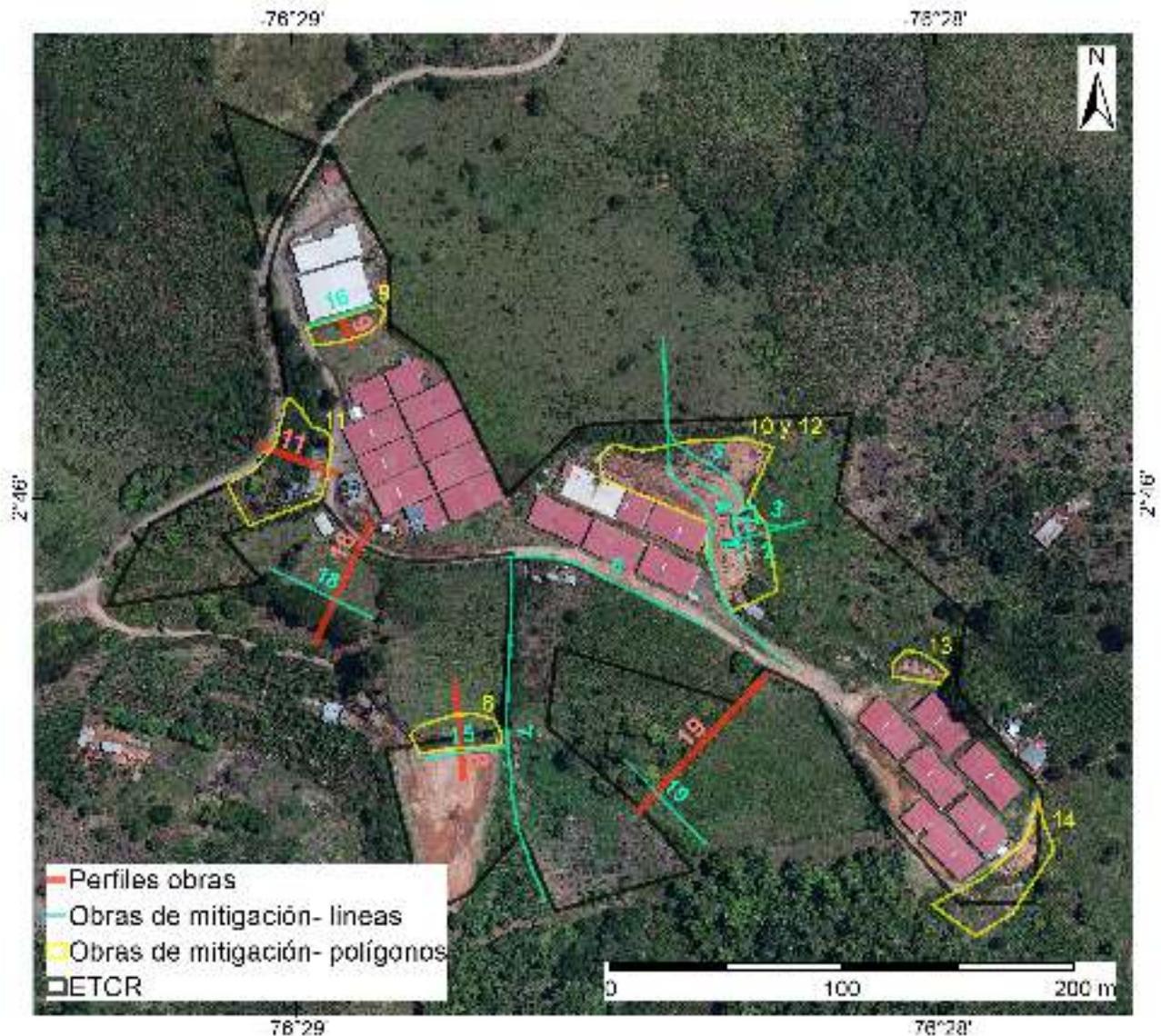


Figura 211: Ubicación obras de mitigación y remediación

### 16.2.1. Obra N°1 - Muro flexible (Gaviones)

Son estructuras flexibles que actúan por gravedad y soportan movimientos verticales y horizontales. Consisten en cajas prismáticas de malla metálica galvanizada rellenas de fragmentos de roca, usualmente se usan cajas de 2m x 1m x 1m unidas por amarres de alambre y no requieren de cimentaciones profundas. Son permeables y deformables, la deformación depende en gran medida del peso de la estructura, con buen desempeño para el control de erosión, estabilidad y caída de rocas.

En la Figura 212 se presentan el esquema recomendado para muro flexible

tipo gaviones de 4 niveles a ser implementado según la Figura 213. La obra N°1 se localiza en en el lleno antropico donde se evidencia un proceso erosivo generado por las aguas lluvias que confluyen a dicha zona y tubería sin la longitud adecuada. El muro cuenta con una longitud de 10m y se ubica en la zona baja del talud. En la Figura 224 se observa el problema de erosión que se presenta.

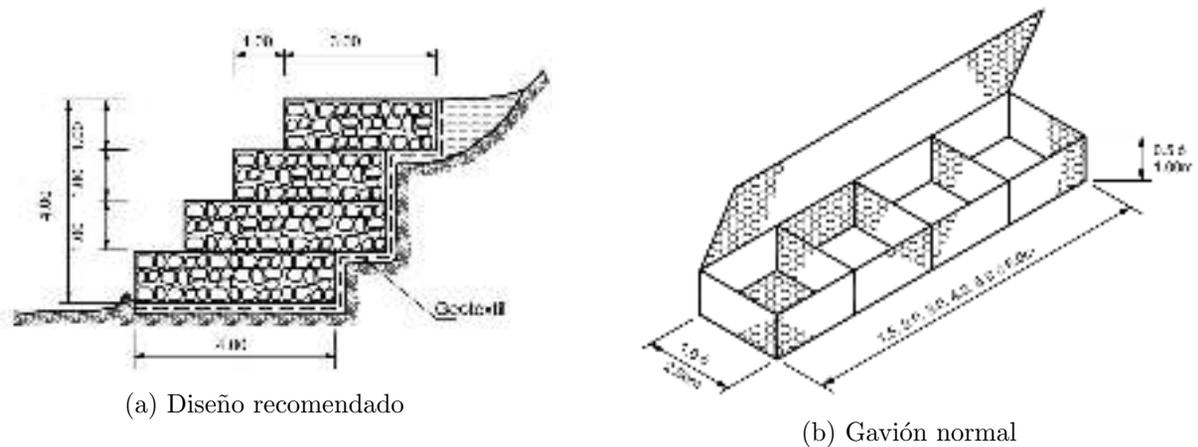


Figura 212: Esquema muro flexible tipo gavión(Suárez, 2009)



Figura 213: Lleno antropico

En la Figura 214 se presenta el perfil para muro flexible (gaviones)

- Se debe restituir el terreno desde la parte superior de los gaviones hasta la

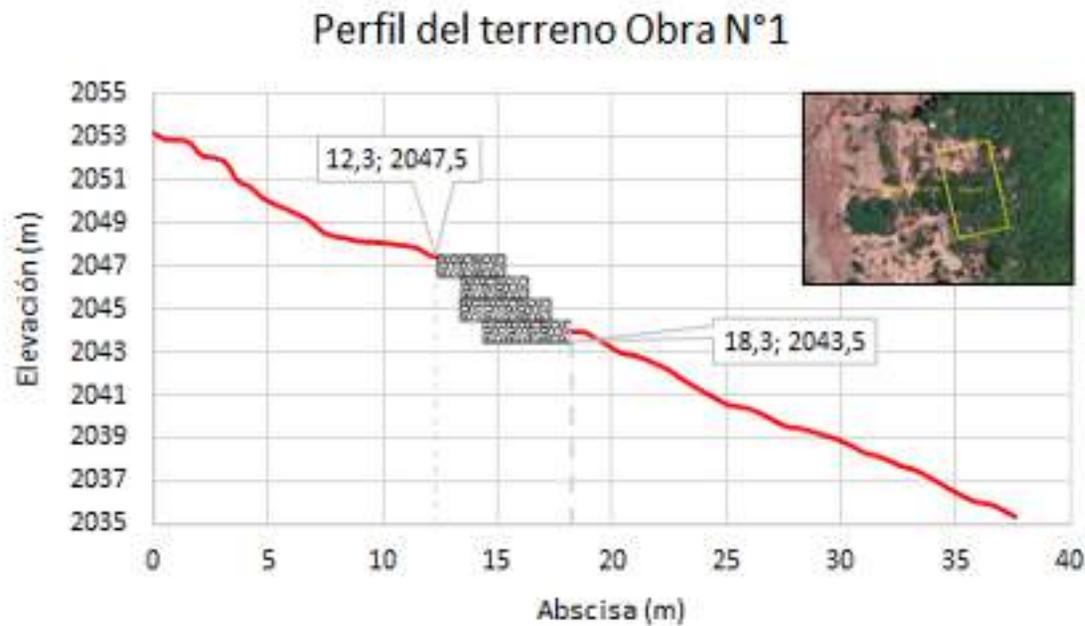


Figura 214: Perfil obra N°1

corona del talud.

- Su construcción debe ser durante el periodo seco y para el manejo de aguas se sugieren canales provisionales en plástico para evacuar el agua hacia los lados de los gaviones.
- Durante la construcción se debe ejecutar la obra correspondiente a la prolongación de la tubería existente en dicha zona.
- En la ejecución debe contarse con personal profesional especializado para supervisión continua de la tarea.

### 16.2.2. Obra N°2 y 3 - Prolongación conducción

Estas dos obras corresponden a prolongación de la tubería existente, la cual aporta al proceso erosivo presentado en la zona, aunque las tuberías no transportan gran cantidad de agua el proceso ha sido constante. Se sugiere la prolongación en tubería del mismo diámetro con una conexión entre ellas, esta medida debe ser provisional ya que estas aguas deben circular por el sistema de alcantarillado futuro. El descole se recomienda sea sobre enrocado como se observa en la Figura 215.

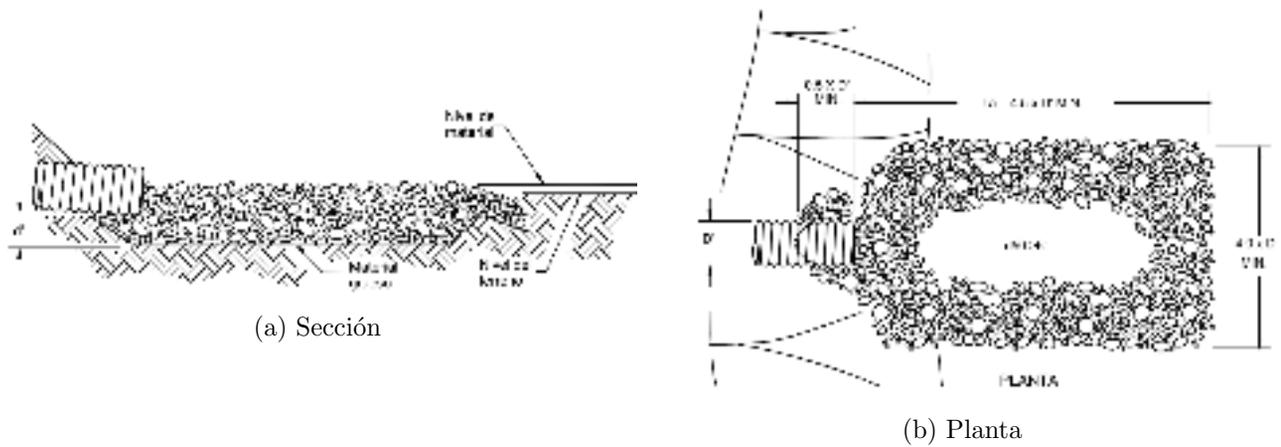
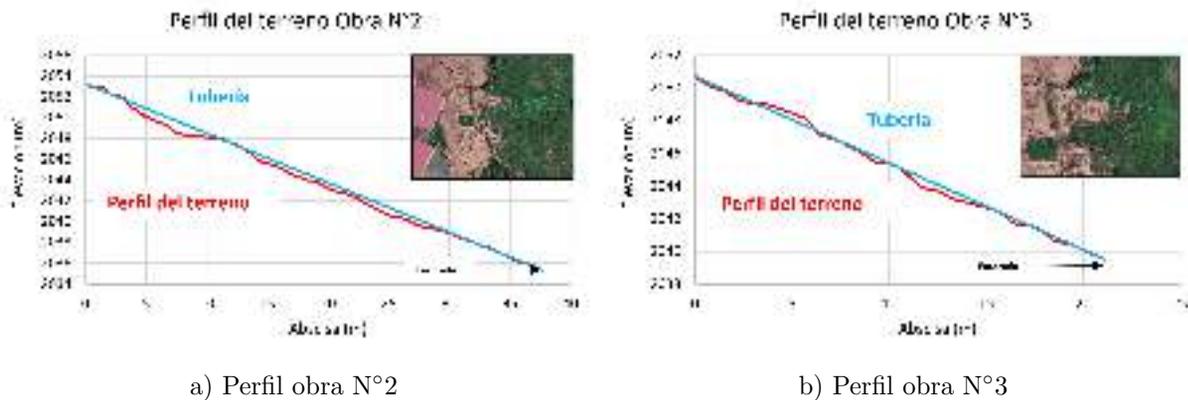


Figura 215: Enrocado en salida de tuberías (Suárez, 2001)

En la Figura 216a y la Figura 216b se presenta el perfil para la prolongación de conducción propuesta.



### 16.2.3. Obra N°4 y 5 - Canal de coronación

Este canal es necesario para la recolección y conducción de agua de escorrentía que ingresa desde la vía y circula por las terrazas del lleno antrópico causando erosión. Se sugiere la construcción de dos canales, la obra N°4 en la terraza superior iniciando desde la vía y la obra N°5 en la terraza inferior, ambas obras para reducir la erosión. El canal propuesto (Figura 217) debe ser construido en concreto de  $f' = 21MPa$  y como refuerzo utilizar grafil  $\phi = 5mm$  cada 25cm en ambos sentidos, la pendiente del canal debe ser mínimo del 5%.

Los canales se encuentran ubicados zona interna de la terraza debido a las condiciones del material; ubicarlo cerca a la cara del talud puede causar condiciones de inestabilidad. La pendiente de las terrazas debe ser hacia el canal correspondiente, con una pendiente entre 5% y 10%.

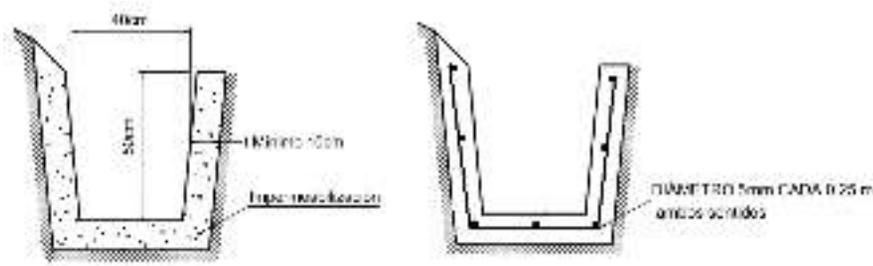


Figura 217: Canal de coronación

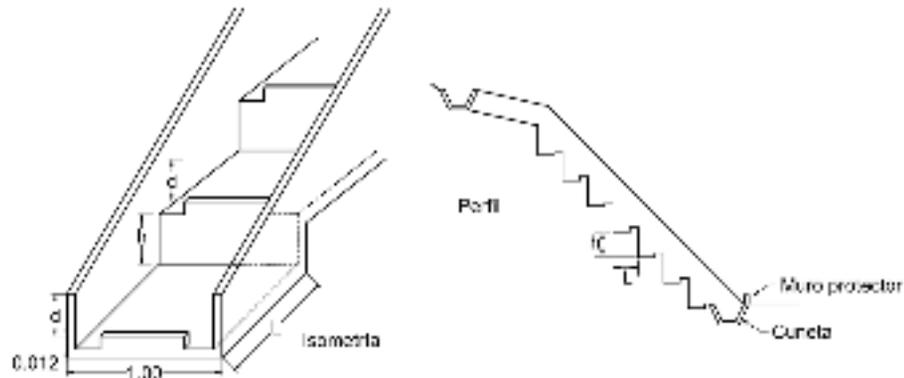


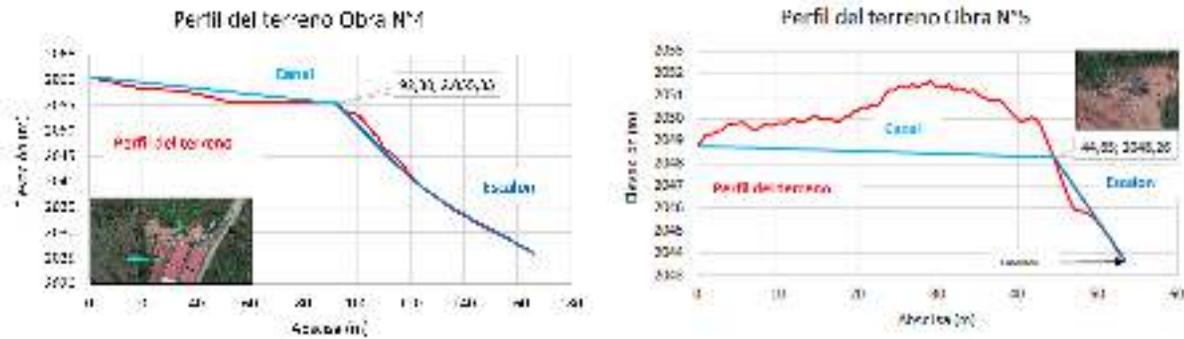
Figura 218: Canal escalonado (Suárez, 2001)

Para evacuar las aguas recolectadas por ambos canales, se propone el canal escalonado con disipadores presentado en la Figura 218. En este vierten las aguas de ambos canales y es evacuada al drenaje natural, debe tenerse en cuenta que estas aguas también deben ser incluidas en el sistema de alcantarillado futuro. EL canal escalonado presenta una altura  $h=0,5m$ , longitud de escalón  $L=1,1m$  y  $d$  mínimo de  $0,3m$ . Para evitar la socavación en la salida del canal se requiere una cama de enrocado similar a la presentada en la Figura 215. A corto plazo debe gestionarse ante autoridades ambientales puntos de vertimiento de estas aguas.

En la Figura 219a a Figura 219b se presenta los perfiles para las obras propuesta.

#### 16.2.4. Obra N°6 - Cuneta vía

Del lado sur de la vía interna del antiguo ECTR, no se evidencia obras de recolección y conducción de aguas lluvias, con la intención de evitar su infiltración y erosión se propone la construcción de cuneta (Figura 211). La Cuneta debe se construida sobre material compactado tipo base granular, en concreto de  $f' = 21MPa$  según lo indicado en la Figura 220. Además, la conexión de



a) Perfil obra N°4

b) Perfil obra N°5

la cuneta y la obra N°7 debe realizarse en canal escalonado con una altura  $h=0,5m$ , longitud de escalón  $L=0,5m$  y  $d$  mínimo de  $0,5m$  como lo esquematiza la Figura 218.

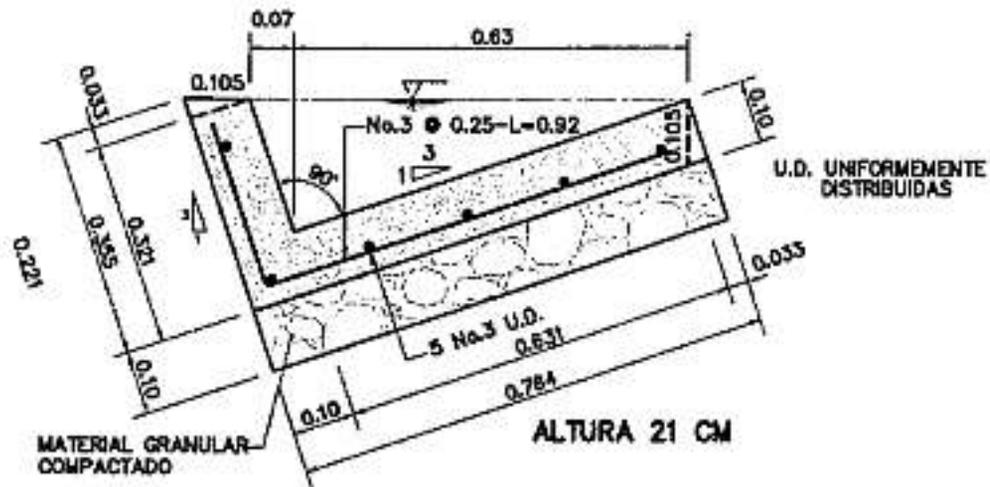


Figura 220: Cuneta vía (Secretaría de infraestructura física departamento de Antioquia, 2019)

La Figura 221 presenta el perfiles para la obra propuesta.

### 16.2.5. Obra N°7 - Canal en piedra

Esta obra corresponde a la adecuación de un surco existente que surge en la vía y va hasta la parte baja de la ladera, a este se conecta la cuneta de la obra N°6 y canales de las obras N°10 y 11. El canal debe ser construido en canto rodado sobre concreto y no sobre mortero para tener mayor durabilidad. Debido a la pronunciada pendiente el canal requiere de la construcción de disipadores de  $0,15m$  cada  $5m$  como se observa en la Figura 222. Esta recomendación corres-



Figura 221: Perfil obra N°6

ponde a una obra provisional, debe definirse una obra definitiva que recolecte las aguas de la vía, laderas aledañas y taludes hasta un punto de vertimiento adecuado y permitido por las autoridades ambientales.

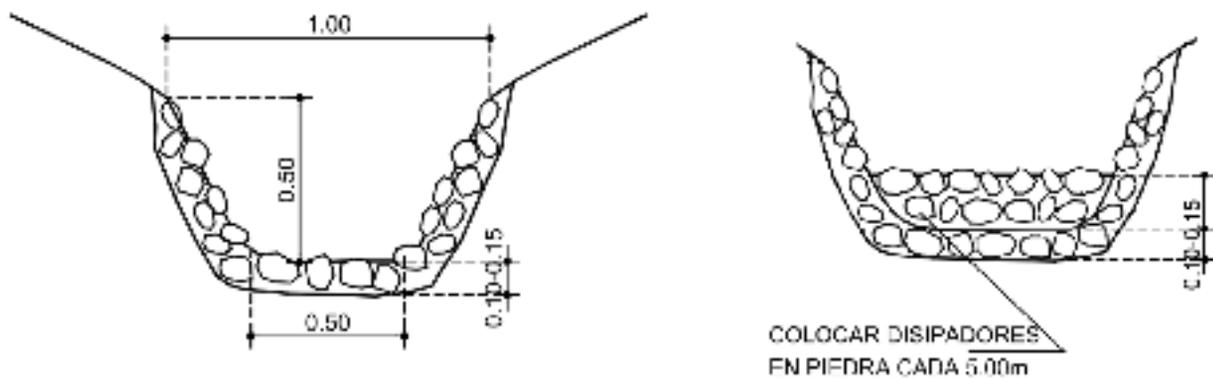


Figura 222: Canal de piedra (Suárez, 2001)

La Figura 223 presenta el perfiles para la obra propuesta.

### 16.2.6. Obra N°8, 9, 10 y 11 - Modificación de geometría

Es una de las primeras medidas de mitigación, con la cual se pretende mejorar las condiciones de equilibrio mediante la reducción de volumen y cambio de geometría del terreno. En el cambio de geometría se consideran varias soluciones las cuales pueden ser combinadas, tales como:

- Disminuir la pendiente mediante el perfilado del talud
- Generar varios niveles mediante terrazas



Figura 223: Perfil obra N°7

- Generar curvaturas suavizando el terreno
- Generación de bermas
- Remoción de material en la cabecera del talud

La obra N°8 corresponde al talud que se encuentra tras la explanación usada como cancha actualmente y localización de futura PTAR. El cambio de geometría se realiza para la protección de la planta a construir. La obra N°9 se ejecuta sobre el talud que se encuentra en la zona lateral del auditorio al ingreso del antiguo ETCR, con la intención de reducir el volumen y altura de talud en esta zona. Se recomienda la generación de una berma intermedia de 2m, con taludes no mayores a los 5m de altura y la pendiente de la berma debe ser hacia dentro entre 5% y 10%.

En la sección 12.8 se realiza el análisis de estabilidad para sectores críticos, en este análisis se determinó la necesidad de cambio de geometría en las zonas de los cortes C1-C3 (lleno antrópico) y C5 correspondientes a las obras N°10 y 11 respectivamente.

El corte C1 y C3 se ubican sobre el lleno antrópico, en el análisis (2D) fue necesario el retiro de dicho material para obtener un perfil estable, es necesario un estudio más profundo enfocado a dicha zona. Se recomienda inicialmente el terraceo y perfilación del lleno existente con maquinaria liviana, debido a las características geotécnicas que presenta el material. Más adelante se exponen otras medidas aplicadas a la zona.



Figura 224: Talud - Obra N°8

El corte C5 se ubica en la zona NW y cruza la vía, se recomienda la generación de dos terrazas en la zona establecida en el polígono (Figura 211). Debe analizarse la posibilidad de intervención en zonas externas, según los análisis (2D) las zonas correspondientes a los cortes C4 y C7 también requieren de cambio de geometría pero dichas zonas se encuentran por fuera de los límites del antiguo ETCR.

Al cambio de geometría debe sumarse la implementación de otras medidas como canales y protección superficial. Se sugiere el uso de biomantos de fibras vegetales con la intención de evitar la erosión y disminuir la infiltración en el terreno mientras se restituye la vegetación en los taludes. Los biomantos desaparecen con el tiempo para que la protección contra la erosión sea realizada por la vegetación, ya que son biodegradables.

De la Figura 226a a la 226c presenta los perfiles de cada punto de las modificaciones.

### 16.2.7. Obra N°12, 13 y 14 - Revegetación y/o reforestación

La ausencia de cobertura vegetal aumenta el riesgo por diferentes movimientos en masa, las diferentes plantas evitan la erosión de la superficie, ocasionada principalmente por la escorrentía y aumentan la cohesión del suelo superficial debido a sus raíces. Para la obra N°12 (lleno antrópico) se recomienda la revegetación completa del área mediante la combinación de pasto con plantas

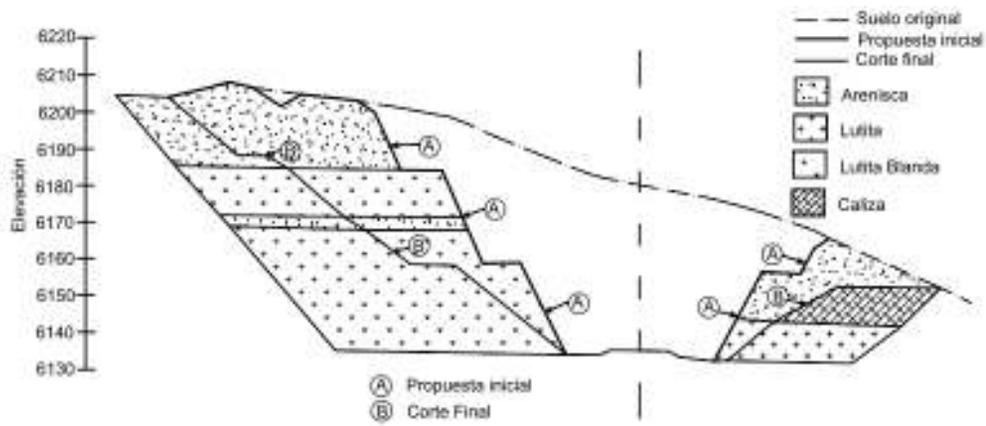
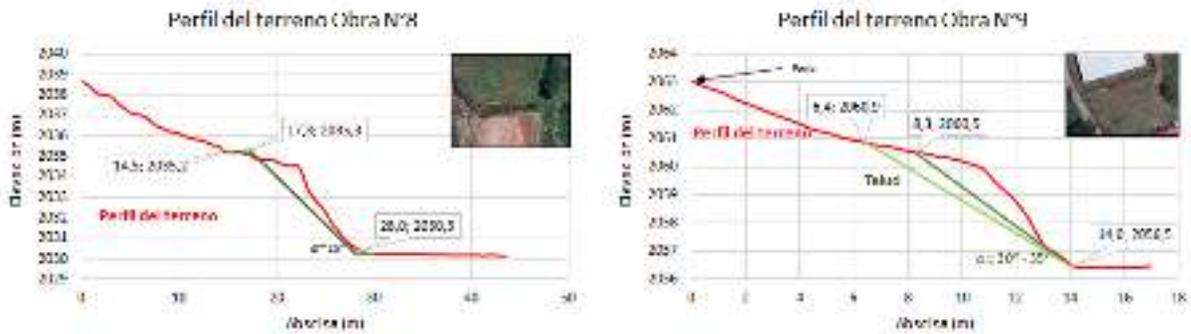


Figura 225: Modificación de geometría de taludes (Suárez, 2001)



a) Perfil obra N°8

b) Perfil obra N°9



c) Perfil obra N°11

que aporten a la cohesión como lo son el Vetiver o arbustos pequeños. Se recomienda no sembrar arboles de gran altura ya que generan sobrepeso en el talud creando condiciones desfavorables. En las obras N°13 y 14 (Figura 227) es necesario evitar la erosión, se recomienda la siembra de plantas teniendo en cuenta la pendiente del talud.

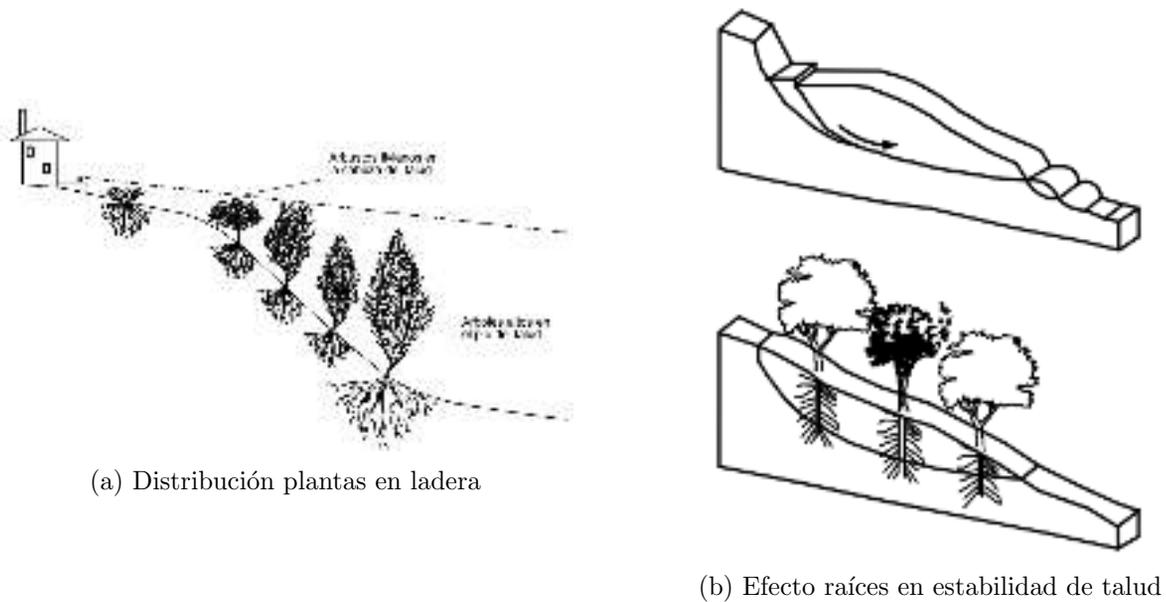


Figura 227: (Suárez, 2001)

### 16.2.8. Obra N°15 y 16 - Canal en talud

Como obras anexas a los cambios de geometría se requiere de la recolección y conducción de agua en las terrazas intermedias y pata del talud. El canal debe estar ubicado al interior y la berma con pendiente hacia este; se recomienda el canal descrito en la Figura 217.

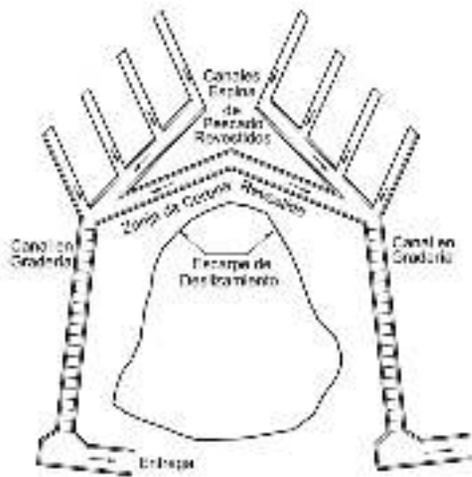
En la Figura 228a, se muestra un ejemplo de canalización con conexión entre canal superior e inferior mediante un canal escalonado, mientras en la Figura 228b se ilustra los canales superior e inferior en talud con revegetación.

### 16.2.9. Obra N°17, 18 y 19 - Subdrenes horizontales

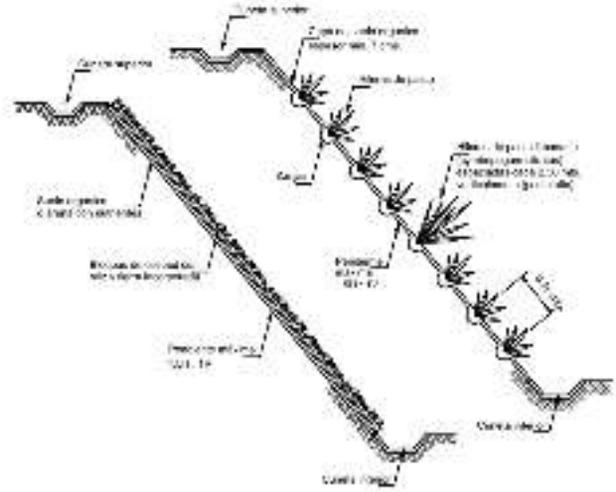
Los subdrenes horizontales o de penetración se usan para la interceptación y control de aguas subterráneas y abatimiento del nivel freático de laderas susceptibles a movimiento o como obra preventiva en taludes.

Consiste en un conjunto de tubos con diámetros entre 2 1/2" y 4", perforados en gran parte de su longitud, dispuestos en la cara del talud e instalados de manera casi horizontal con baja inclinación ( $5^{\circ} - 10^{\circ}$ ). Estos se encuentran recubiertos de geotextil con la intención de evitar el ingreso de material finogranular y sobresalen de la superficie cerca de 30cm (Figura 229).

Acorde a los análisis realizados en la sección 12.8 se sugiere la instalación de drenes horizontales para abatir el nivel de agua en los cortes C3, C7 y C8

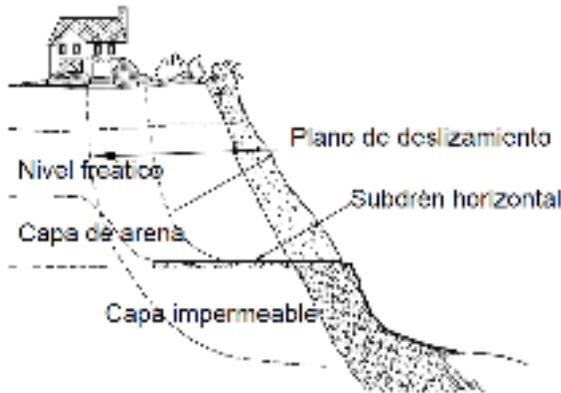


(a) Obras de drenaje en deslizamiento

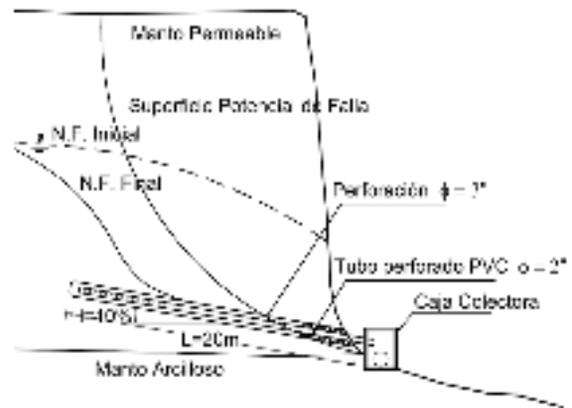


(b) Esquema canal y revegetación

Figura 228: Ilustraciones obra N°10 y 11 (Suárez, 2001)



(a)



(b)

Figura 229: Esquema uso de subdrenes horizontales (Suárez, 2009)

correspondientes a las obras N°17, 18 y 19 respectivamente. En la Figura 211, se presenta la ubicación de las obras, los subdrenes deben ser perpendiculares a la línea indicada, su separación varía entre 10 y 15m con una longitud de 20m (Suárez, 2009). En la Figura 229 se presentan los esquemas para su ejecución según las indicaciones. Además, se enfatiza en que las aguas provenientes de dichas obras deben conducirse mediante obras de drenaje superficial hasta canales de la red de alcantarillado.

En la Figura 230 a la 231 presenta los perfiles de las modificaciones propuestas.



Figura 230: Perfil Obra N°18



Figura 231: Perfil Obra N°19

### 16.3. Condición de riesgo

Tras la evaluación del riesgo y las diferentes medidas de mitigación y remediación se presenta la Figura 232 quien presenta la especialización de aquellas infraestructuras actuales que presenta condición de riesgo mitigable, como aquellas áreas que disminuye su afectación a fenómenos morfodinamicos estudiados como: movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundación con las propuestas realizadas. Las área no mitigables como aquellas áreas que dado su grado de afectación es necesario una reubicación de la infraestructura.

La infraestructura actual es de carácter mitigable dada la aplicación de las obras que potencian la estabilidad de las laderas evaluadas como criticas que podrían ocasionar algún tipo de afectación a la vivienda.

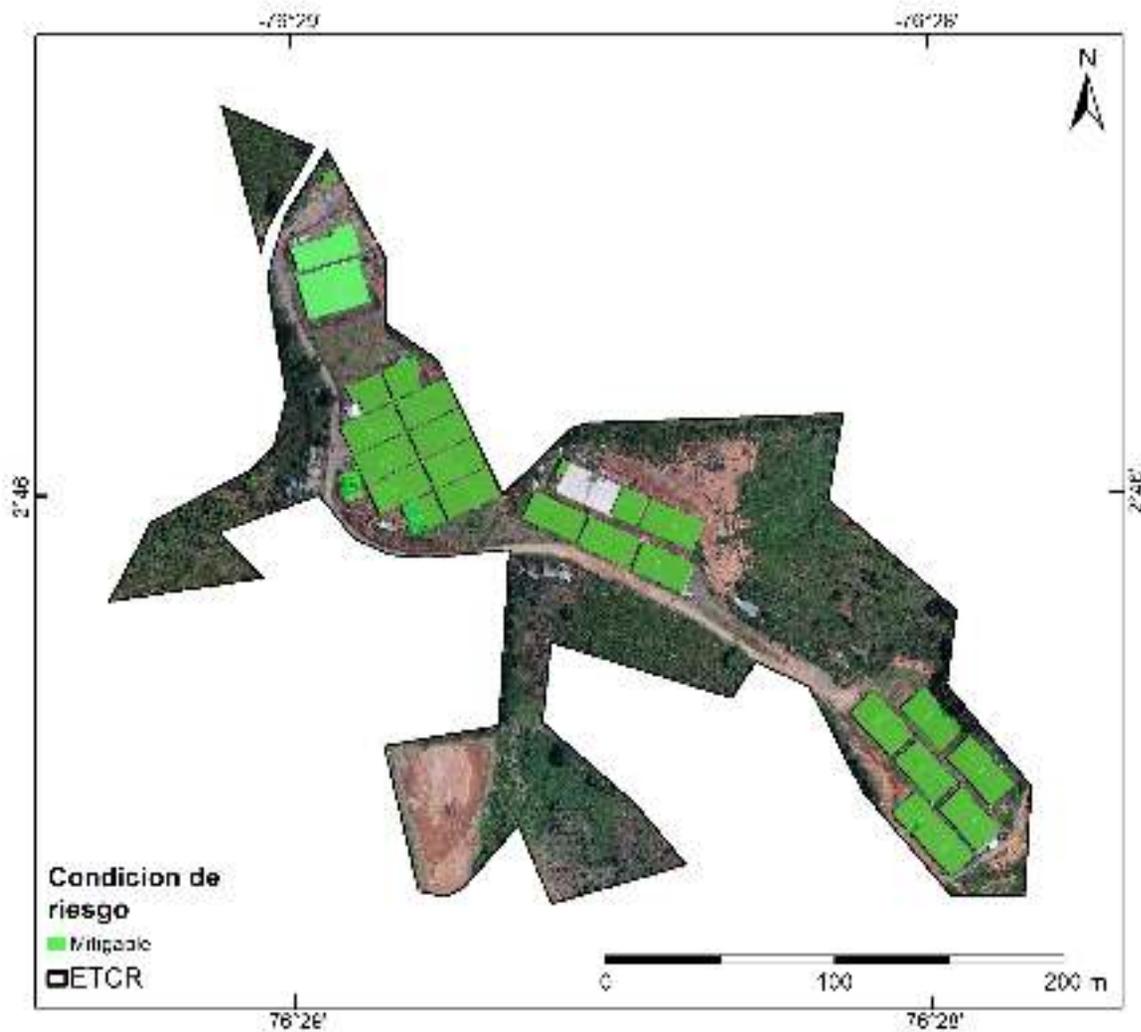


Figura 232: Mapa de condición de riesgo

# Referencias

- Aristizábal, E., González, T., Montoya, J., y Vélez, D. (2011). Análisis de umbrales empíricos para el pronóstico de movimientos en masa. *Revista EIA*, 15, 95–111.
- Canli, . L. B., E. (2018). Spatially distributed rainfall information and its potential for regional landslide early warning systems. *Natural Hazards*.
- Glade, C. M. . S. P., T. (2000). Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical“ antecedent daily rainfall model.”. *Pure & Applied Geophysics*, 157(6–8), 1059.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., y Rossi, . S., M. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98(3–4), 239–267.
- Reichenbach, P., Cardinali, M., y De Vita, . G. F., P. (1998). Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the tiber river basin (central italy). *Environmental Geology*, 35(2), 146–159.
- Secretaría de infraestructura física departamento de Antioquia. (2019). *obras de drenaje y protección para carreteras*.
- Suárez, J. (2001). *Control de erosión en zonas tropicales* (U. I. de Santander, Ed.). Descargado de <https://www.erosion.com.co/control-de-erosion-en-zonas-tropicales.html>
- Suárez, J. (2009). *Deslizamientos. Volumen II: Técnicas de remediación* (U. I. de Santander, Ed.). Descargado de <https://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-ii-tecnicas-de-remediacion.html>
- Thiebes, . G. T., B. (2016). Landslide early warning systems—fundamental concepts and innovative applications. *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*.

## Parte V

# Esquema de aproximación espacial

## Capítulo 17

# Esquema de aproximación espacial

### Introducción

Siendo esta una fase de prefactibilidad, se hace necesario no solo realizar las verificaciones de viabilidad normativa, viabilidad sanitaria y viabilidad de amenaza, vista en los capítulos anteriores, sino que se busca realizar una aproximación presupuestal que tenga en cuenta características propias del antiguo ETCR. Para ello se ha realizado una mesa de trabajo, conjunto con ARN y Viceministerio de Vivienda Rural, para mirar elementos claves que permitan orientar un ejercicio de ubicación de infraestructura futura como una estrategia de verificación a las posibilidades de desarrollo en el espacio actual y así sea un insumo guía para ser evaluadas en detalle arquitectónico, constructivo y económico en las fases siguientes a este convenio.

#### 17.1. Planteamiento espacial

En la búsqueda de plantear las infraestructuras para el antiguo ETCR se hace relevante revisar diferentes elementos claves para poder definir las viviendas, equipamientos y vías que se ha evaluado a lo largo de este estudio para el predio.

En la Figura 233 se observa la restricción marcada con un círculo rojo, que corresponde al retiro de 200 m, estipulado en la resolución 0330 de 2017, a centros poblados para las plantas de tratamiento de agua residual - PTAR-.

En la Figura 234 se muestra el cruce de amenaza de detalle estudiadas en la parte IV, el cual corresponde a amenaza por movimientos en masa, amenaza de inundación y amenaza de avenidas torrenciales. Dentro de esta zonificación se tienen en cuenta la amenaza media y baja, siendo esta última las zonas priorizadas para realizar la propuesta de ocupación.

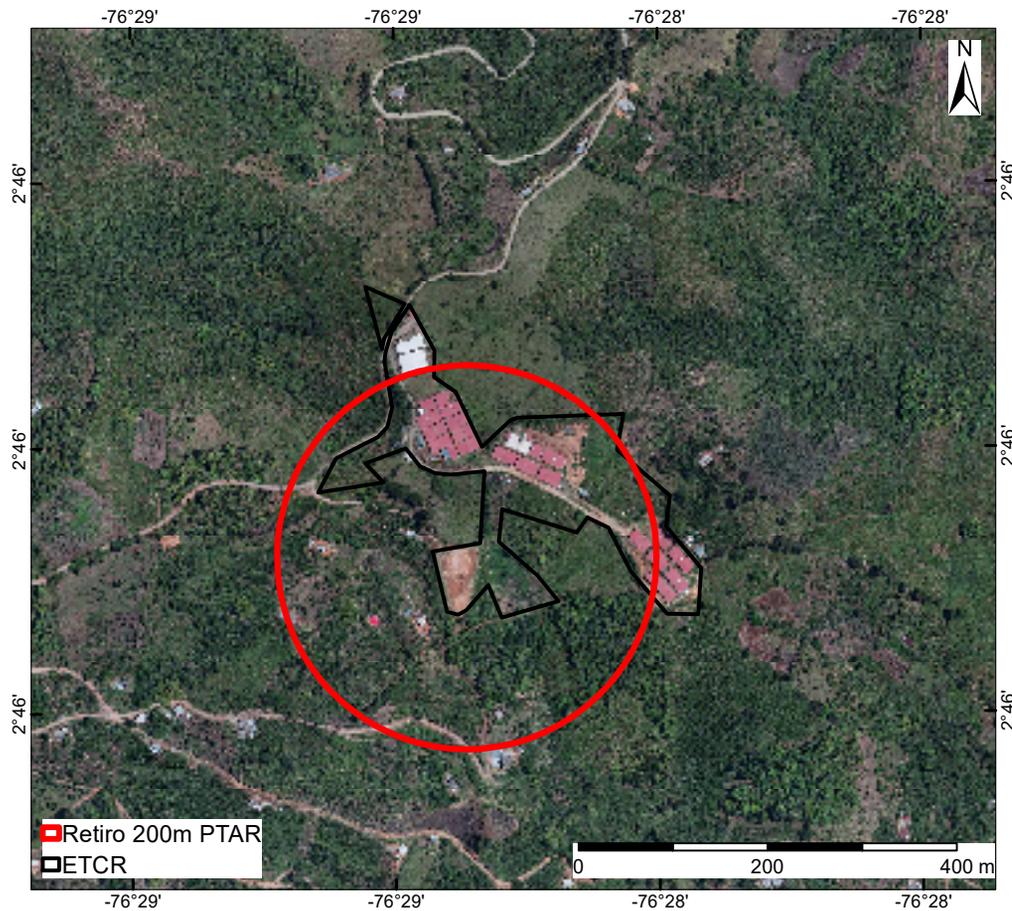


Figura 233: Restricciones normativas

Con el cruce de estos elementos normativos y de amenaza se cuenta con un área neta urbanizable de  $41565,73 \text{ m}^2$ , en la cual se realizará la propuesta para los 216 predios, vías y posibles usos asociados.

en la Tabla 108, se presenta un resumen del análisis realizado en las actividades de campo correspondiente a los equipamientos existentes en el área y a las unidades productivas actúales e ideas futuras de la comunidad. Las actividades productivas principales giran en torno al cuidado de cerdos y agroindustria.

En la revisión de posible infraestructura adicional se evalúa la disponibilidad de instituciones educativas y para ello se hace una verificación con información cartográfica de las infraestructura educativa comparada con la distancia plana que se encuentra del ETCR, obteniendo: que cuenta con 149 instituciones que varían entre educación preescolar, primaria y secundaria en una radio de 20 km, de las cuales, 4 se encuentran a una distancia menor a 2.5 km.

Continuando con la ejercicio de verificación de infraestructura se plantea realizar el ejercicio sin tener en cuenta la ubicación de infraestructura actual del

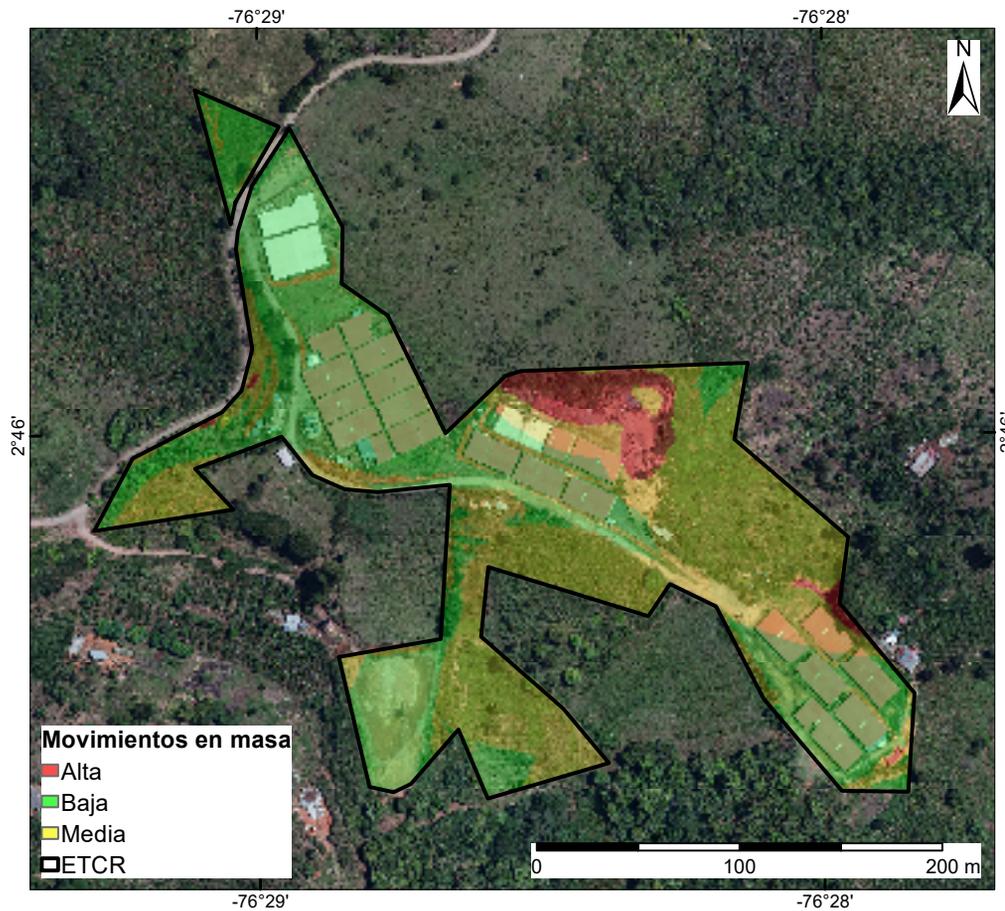


Figura 234: Evaluación de amenazas

antiguo ETCR, es decir realizar el ejercicio como si fuera un espacio vacío y verificar la disponibilidad de espacios para desarrollar a futuro primando elementos deportivos como una cancha y un centro comunitario. Resaltando que lo primordial es la verificación de las viviendas y los demás espacios corresponden a una fase posterior con la comunidad del antiguo ETCR y disponibilidad espacial final.

Respecto a las unidades productivas que, en conjunto con la ARN, se lograron identificar. se resalta que las unidades productivas requieren infraestructuras que no están siendo tenidas en cuenta en este documento y deberán ser estudiadas con mayor detalle en fases siguientes.

Tras los análisis mencionados, se presenta a continuación los elementos propuestos para el antiguo ETCR como equipamientos, vías y viviendas.

Tabla 108: influencia de instituciones educativas y unidades productivas

ETCR		Los Monos
<b>Área total</b>		44698,54
<b>Número de viviendas</b>		216
<b>Población</b>		92
<b>Instituciones educativas</b>	0 - 1 km	0
	1 - 2,5 km	4
	2,5 - 10 km	27
	10 - 20 km	118
	<b>TOTAL</b>	<b>149</b>
<b>Unidades productivas</b>	Agroindustria. Cerdos	
<b>Equipamientos existentes</b>	Auditorio abierto, Cementerio, Planta de aguas, Carpintería, Sala de confecciones, Cooperativa	

### 17.1.1. Equipamientos

Reconociendo la importancia de promover el intercambio social y cultural en el antiguo ETCR, se plantean infraestructuras de usos complementarios a la vivienda que suplen necesidades básicas como sitios de reunión y recreación para la población. De acuerdo con lo anterior, se tienen en cuenta 2 posibles equipamientos de los cuales la comunidad ha manifestado en los encuentros territoriales, su importancia.

- **Cancha múltiple**

La cancha de césped podría contar con un área de  $44 \text{ m} \times 24 \text{ m} = 1056 \text{ m}^2$  y una dotación mínima de arcos y sistemas de anclaje. En el diseño se tiene en cuenta: base estructural de soporte y drenaje, demarcación, red eléctrica y andenes de transición.

- **Centro comunitario**

Este equipamiento podría contar con espacios que permiten la integración social y el intercambio cultural al interior del antiguo ETCR. Están contemplados talleres, salón múltiple, cocina, zonas administrativas y batería de servicios.

Para la determinación del área de este equipamiento, se tiene en cuenta la guía de diseño Colegios 10, que plantea que un salón comunitario debe presentar  $2.8 \text{ m}^2$  por habitante. Para Los Monos, teniendo en cuenta una población de 92 habitantes, el centro comunitario tiene  $257,6 \text{ m}^2$

### 17.1.2. Viviendas

Teniendo en cuenta que el desarrollo de la infraestructura es de carácter nueva y estará ceñida a los lineamientos dados desde la Dirección de Vivienda Rural en sus diferentes componentes de subsidio y estructura, se realizarán los cálculos con las 6 tipologías presentadas durante las mesas de trabajo..

El análisis se centra en la conformación espacial distribuida entre 54 y 56  $m^2$ , cumpliendo con los estándares básicos propuestos para definirla como una vivienda digna en Colombia, la cual incluye:

- 3 habitaciones
- Espacio múltiple
- Cocina
- Cuarto de herramientas
- Saneamiento básico
- Terrazas

El tamaño de cada uno de estos espacios varía en menor medida según la distribución que va desde viviendas alargadas, cuadradas, en "Lz en ü", que permite diferentes implantaciones en los predios de acuerdo con las necesidades particulares que deben ser evaluadas y ajustadas en etapas de diseño. (<https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/fichas-tecnicas-vivienda-nueva-vivienda-rural.pdf>).

En Figura 235 se presenta una propuesta de los 216 predios con un área de 150  $m^2$  en el cual se podría ajustar a cualquiera de las 6 tipologías y contar con área para una huerta personal.

Se resalta que dados los estudios realizados previamente, estas viviendas contarán con plantas de tratamiento de aguas potable y residuales, lo cual permite que no se tenga en cuenta una alberca en cada módulo de vivienda.

### 17.1.3. Infraestructura vial

Dentro del desarrollo urbanístico, se contemplan elementos importantes como son las zonas de acceso peatonal y de vehículos. En la actual propuesta se tiene en cuenta las vías existentes en el antiguo ETCR y se plantea un sistema de caminos peatonales que permite el acceso a las propuestas de predios mostrados en el capítulo de riesgo.

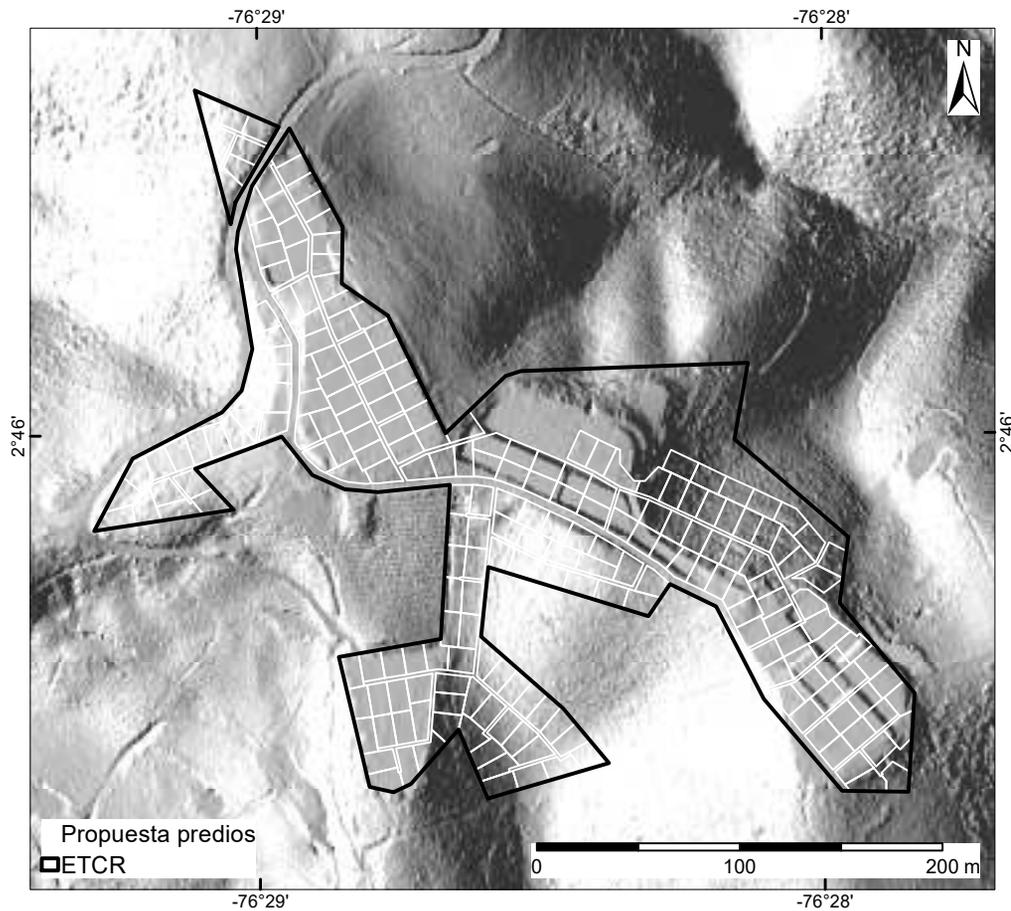


Figura 235: Propuesta de predios

La vía vehicular principal es de tercer orden, es decir, que cuenta con una sección de 6 m y los caminos peatonales de 1,8 m. En La Figura 236 se muestra el planteamiento espacial de las vías y senderos peatonales para el antiguo ETCR con 463,13 m de vía vehicular y 1212,66 m de senderos peatonales.

## 17.2. Borrador norma urbanística objeto de ajuste en Los Monos

Con base en el análisis de normativa urbanística del PBOT vigente del Municipio de Caldono, la cantidad de viviendas demandadas en cada ETCR y el ejercicio de cabida de lotes y edificaciones realizadas sobre áreas netas urbanizables, se presentan la propuesta de norma urbanística objeto de modificación e incorporación en el Plan de Ordenamiento a través del procedimiento de ley.

Cada norma debe ser ubicada dentro del proyecto de Acuerdo que adoptará el POT en el componente respectivo y de acuerdo a su jerarquía.

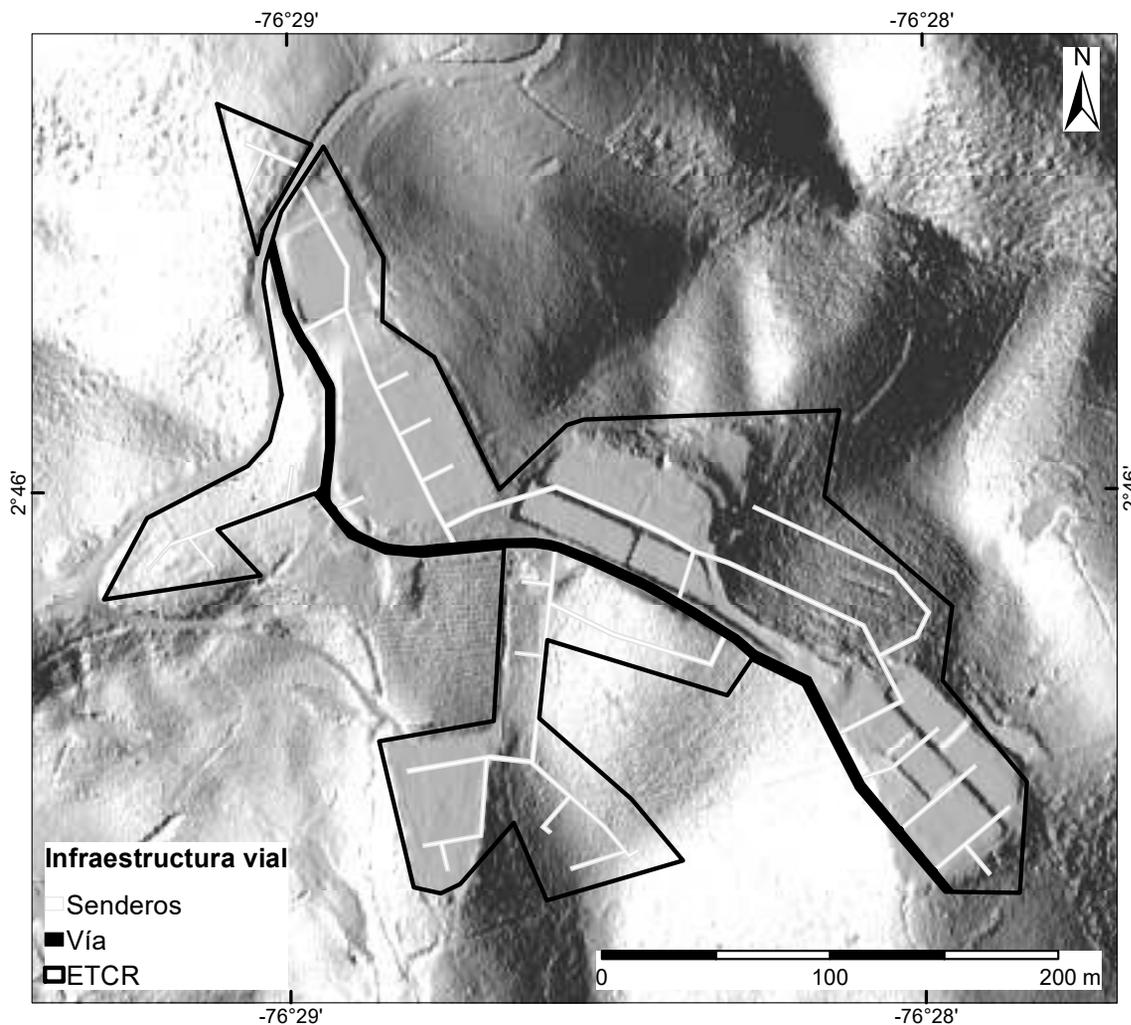


Figura 236: Infraestructura vial propuesta

### 17.2.1. Componente general

#### Titulo XX. Clases de suelos

##### Artículo 1°. Suelo Suburbano

Adiciónese el Artículo 21 del Acuerdo 23 de enero de 2006 en la siguiente expresión:

También hace parte del suelo suburbano los terrenos de los Antiguos Espacios Territoriales de Consolidación y Restauración.

Los diferentes suelos rurales de categoría suelo suburbano se delimitan en el Mapa xxx. Suelos suburbanos

##### Artículo 2°. Umbral de suburbanización

A partir del carácter de desarrollo de baja ocupación y densidad del suelo

suburbano, las posibilidades de suministro de agua potable y saneamiento básico, las normas de conservación y protección del medio ambiente, se establece un umbral máximo de suburbanización del xxx % del suelo rural, equivalente a una superficie aproximada de xxxx ha, agrupando las diferentes subcategorías de suelo suburbano.

### **Artículo 3°. Participación en Plusvalía.**

El Municipio de Caldono participará de la plusvalía causada por los siguientes hechos generadores:

1. La consideración de parte del suelo rural como suburbano.

El porcentaje de participación en las plusvalías será el 30 % del incremento del valor del suelo causado por los hechos generadores.

## **17.2.2. Componente rural**

### **Título XX. Vías y movilidad**

#### **Artículo 4°. Jerarquización vial rural.**

Son las vías que en sus diferentes categorizaciones ya sea para transporte público o privado y de carga, se encuentran adscritas dentro de la zona rural del Municipio y que no hacen parte de la red Vial Nacional jerarquizadas como se establece a continuación:

1. **Vías Primarias Rurales.** Son las vías que comunican la cabecera de los corregimientos con las respectivas veredas, así como las veredas entre sí, en uno o más corregimientos; adicionalmente pueden formar parte de anillos veredales y vías que comunican con los centros poblados.
2. **Vías Secundarias Rurales** Son las que permiten el acceso directo a las veredas desde las vías primarias y las interconexiones principales entre éstas.
3. **Vías Terciarias Rurales** Son las que sirven de acceso a partir de la red primaria o secundaria, a uno o varios predios teniendo un alcance limitado.
4. **Vías Privadas.** . Conjunto de vías vehiculares ubicadas al interior de las propiedades, cuya función principal es facilitar el acceso desde el sistema vial municipal.

#### **Artículo 5°. De las secciones viales.**

Según la jerarquía vial establecida en el Artículo 4 del presente Acuerdo se establece las siguientes secciones viales mínimas:

1. Vías Primarias Rurales. Tendrán las siguientes secciones: Calzada mínima: 6 metros, cuneta - berma o andén según el caso: 2 metros c/u, sección pública mínima: 10 metros, antejardín: 10 metros, retiro mínimo: 15 metros a eje de vía.
2. Vías Secundarias Rurales. Las vías secundarias se ejecutarán con la siguiente sección vial mínima: Calzada mínima: 4 metros. Cuneta-berma o andén según el caso: 1,5 metros c/u. sección pública mínima: 7 metros. Antejardín: 10 metros y retiro mínimo: 13,5 metros a eje de vía
3. Vías Terciarias Rurales. Las vías terciarias se ejecutarán con la siguiente sección vial mínima: Calzada mínima: 4 metros. Cuneta-berma o andén según el caso: 1,5 metros c/u. Sección pública mínima: 7 metros. Antejardín: 10 metros. Retiro mínimo: 13,5 metros a eje de vía.
4. Vías Privadas. Las vías privadas se ejecutarán con la siguiente sección vial mínima: Calzada mínima: 3 metros. Cuneta-berma o andén según el caso: 1,5 metros c/u. Sección pública mínima: 6 metros.

## **Titulo XX. Uso del suelos**

### **Artículo 6°.De la zonificación de los usos del suelo.**

La zonificación de usos del suelo rural identifica la forma adecuada de utilizar el territorio de acuerdo con la distribución de recursos, las características de cada espacio y las implicaciones sociales y ambientales, sociales, culturales y económicas de cada actividad; constituye una acción esencial en el uso racional de los recursos naturales, en la búsqueda de la sostenibilidad del territorio, tal como se espacializa en el Mapa xx. (Usos del Suelo Rural).

### **Artículo 7°.Usos del suelo rural.**

En el suelo rural se determinan los siguientes usos:

1. Forestal Protector
2. Forestal Productor
3. Uso agroforestal
4. Uso agropecuario
5. Uso agrícola
6. Áreas Mineras

## 7. Usos en suelos suburbanos

### Artículo 8°. De la mezcla de usos en los suelos suburbanos

Adiciónese el Artículo 107 del Acuerdo 032 de diciembre 04 de 2009: La mezcla de usos del suelo en suelos suburbanos es la siguiente: 109:

Tabla 109: uso del suelo

Uso principal	Uso compatible o complementario	Uso condicionado o restringido
Agricultura	Vivienda, Comercio minorista cotidiano (actividades de primera necesidad que permitan satisfacer las necesidades básicas de la comunidad). Servicios comunitarios y mercantiles de baja intensidad (Peluquerías, restaurantes, cafeterías, alojamiento, entre otros). Agricultura (ERA) unidad de medida hortícola, y de mediana ocupación. Practicas agropecuarias de especies menores y escalonadas. Centros de acopio de almacenamiento o mercados verdes y logística de apoyo a la economía y cultura local. Servicios de turismo sostenible. Equipamientos comunitarios, básicos sociales, acorde con el nivel de centralidad establecida. Ganadería intensiva bovina, porcina, caprina y similares, aves de corral. Piscicultura. Plantaciones forestales	Los depósitos de vehículos de transporte público, industria artesanal, pequeña y mediana.

Parágrafo. Los usos del suelo no permitidos en la tabla anterior se consideran usos prohibidos.

### Artículo 9°. Régimen de interrelación de usos del suelo

El régimen de interrelación corresponde a las proporciones de terreno que podrá destinarse un lote de terreno a los usos principales, complementarios y restringidos según las actividades permitidas en el artículo anterior sobre su área neta urbanizable.

Tabla 110: Uso con áreas mínimas y máximas

Usos	Área mínima	Área Máxima
Uso Principal	50 %	100 %
Uso Complementario	0 %	40 %
Uso Restringido	0 %	10 %

Parágrafo. En el caso de existir suelos de protección ambiental, el régimen de usos del suelo sobre dichas áreas será el determinado en la respectiva categoría de protección. Ver Capítulo xxx. Suelos de Protección Ambiental.

## **Titulo XX. Aprovechamiento urbanístico**

### **Artículo 10°. Densidades habitacionales**

La densidad habitacional se define como la cantidad de unidades de vivienda por hectárea bruta que puede soportar un territorio dentro de un polígono o tipo de tratamiento determinado. Para el suelo rural, se establece en concordancia con la política de bajas densidades y con prevalencia de la valoración de los aspectos ecológicos del área rural.

La densidad habitacional establecida para cada polígono de uso del suelo es la siguiente Tabla 111:

Tabla 111: Densidad habitacional

<b>Uso del suelo</b>	<b>Densidad</b>
Usos en suelo suburbano	50 viv/ha

### **Artículo 11°. Índice de Ocupación en suelos suburbanos**

Modifíquese parcialmente el Artículo 116 del Acuerdo 032 de diciembre 04 de 2009:

El índice de ocupación, correspondiente al área máxima a ocupar con construcciones en primer piso en suelos suburbanos se establece en 30 %.

### **Artículo 12°. Altura de edificaciones**

Modifíquese parcialmente el Artículo 116 del Acuerdo 032 de diciembre 04 de 2009: Para suelos suburbanos se establece una altura máxima de 2 pisos más buhardilla integrada a la vivienda. Los niveles de sótanos o semisótanos.

## **Titulo XX. Obligaciones urbanísticas**

### **Artículo 13°. De las obligaciones urbanísticas**

Para las parcelaciones se establecen Tabla 112 las siguientes cesiones urbanísticas:

## **Titulo XX. Normas de parcelación**

### **Artículo 14°. Área mínima de lote en suelos suburbanos**

Modifíquese parcialmente el Artículo 116 del Acuerdo 032 de diciembre 04 de 2009:

Tabla 112: Cesiones urbanísticas

CÓDIGO	COBERTURA	ESPACIO	EQUIPAMIENTOS (construcción)	
	BOSCOSA	PÚBLICO (suelo)	VIVIENDA m2	OTROS USOS %
xxxxxx	15 % del área neta del lote resultantes de proceso de parcelación	5 % Área bruta del lote objeto de parcelación	20 m por cada destina-ción de vi-vienda	1 % del área total construida

Corresponde a un parámetro que la preservación de las calidades ambientales, paisajísticas y productivas del suelo rural, así como de evitar la saturación del suelo con altas densidades habitacionales.

El área mínima de los lotes para desarrollos por subdivisión o parcelación en suelos suburbanos es de 150 m<sup>2</sup>.

**Artículo 15°. Frente mínimo de lote**

Modifíquese parcialmente el Artículo 116 del Acuerdo 032 de diciembre 04 de 2009:

El frente mínimo en suelos suburbanos se establece en 10 m.

**Artículo 16°. Antejardines**

Todo lote producto de procesos de parcelación o subdivisión generará un antejardín de 4 m sobre el acceso del inmueble los cuales permanecerán en cobertura vegetal y no podrá ser reemplazado por piso duro.

**Artículo 17°. Cerramientos de lote**

En suelo rural se permiten las divisiones de predios en cercos vivos o separaciones en alambrón liso o de púas.

En cualquier caso se prohíbe la instalación de cercas eléctricas sobre vías públicas, vías privadas o servidumbres.

**Titulo XX. Normas volumétricas**

**Artículo 18°. Área mínima vivienda**

Modifíquese parcialmente el Artículo 116 del Acuerdo 032 de diciembre 04 de 2009:

Se establece un área mínima de vivienda de 45 m<sup>2</sup>.

**Artículo 19°. Área de local**

Modifíquese parcialmente el Artículo 116 del Acuerdo 032 de diciembre 04 de 2009: El área mínima de local comercial se establece en 24 m<sup>2</sup>. y un máximo

de 250  $m^2$ .

**Artículo 20°. Retiros de construcción a linderos.**

Modifíquese parcialmente el Artículo 116 del Acuerdo 032 de diciembre 04 de 2009:

Toda edificación conservará un retiro mínimo de 5 metros a todos los linderos.

**Artículo 21°. Iluminación y ventilación**

Todo espacio de la edificación tendrá ventilación directa a través de patios, fachadas y vacíos.

**Artículo 22°. Condiciones mínimas de habitabilidad**

Cualquier desarrollador antes de entregar u ocupar una vivienda deberá tramitar el correspondiente certificado de ocupación.

Se considera que una vivienda puede ser habitada cuando además de cumplir con todas las normas urbanísticas establecidas en el presente Acuerdo, cumple con los siguiente requisitos mínimos de acabados:

1. Existencia física de Techo, muros en obra gris, puertas y ventanas sobre fachadas, patios y vacíos.
2. Existencia de cocina, salón múltiple y 2 habitaciones.
3. Baño con equipos sanitarios y ducha con enchape en piso y muros.
4. Existencia de puerta en Baños.
5. Existencia de poyo y pozuelo en cocina.
6. Existencia de lavadero en zona de ropas.

### **17.3. Presupuesto**

A continuación, se presenta los valores económicos de los rubros de viviendas, infraestructura vial básica y equipamientos complementarios mencionados en el capítulo anterior priorizados para el antiguo ETCR. Además, se presenta los valores aproximados de las obras de mitigación y plantas de tratamiento de agua vistos en los capítulos de estudios de detalle y viabilidad sanitaria respectivamente. El presupuesto detallado, se puede visualizar en el Anexo 5 que presenta un archivo de cálculo con los pertinentes elementos de cantidad, unidad y precio 2020 - 2021.

Se resalta que los presupuestos acá presentados se realizan teniendo en cuenta proyectos ejecutados anteriormente en el país y Proyectos Tipo, que hacen parte

de una iniciativa del Departamento Nacional de Plantación en la búsqueda de plantear soluciones ágiles para construcciones a nivel Nacional.

Los valores económicos y cantidades aquí consignados pueden variar teniendo en cuenta particularidades de materiales, transporte y mano de obra. Se resalta que cada presupuesto debe ser evaluado y ajustado de acuerdo con los diseños específicos de cada estructura a la hora de ser ejecutados.

Los precios de las infraestructuras futuras se proyectan para el 2021 teniendo en cuenta el incremento del promedio del IPC de los últimos 5 años, correspondiente al 3,21 % para la infraestructura vial, equipamientos, obras de mitigación y plantas de tratamiento de aguas y un incremento del 5 % en el salario mínimo legal vigente para las viviendas.

### 17.3.1. Equipamientos

En la Tabla 113 se presentan los valores totales calculados para los equipamientos de cancha y centro comunitario, el primero de ellos ya se viene desarrollando en el predio actualmente y por ello debe ser evaluada su localización y pertinencia en el momento de las implantaciones arquitectónicas en la siguiente fase.

Tabla 113: Resumen costo equipamientos

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR TOTAL
<i>EQUIPAMIENTOS</i>		\$ 918.496.778
Cancha múltiple en césped	1	\$ 518.496.849
Centro comunitario	257,6	\$ 399.999.929

### 17.4. Viviendas

En la Tabla 114 se presentan los valores totales de cada tipología presentada por la Dirección de Vivienda Rural, para las 216 viviendas en las diferentes opciones de tipología, entendiendo que estas serán definidas en una etapa siguiente. Se resalta que existe la posibilidad de mezcla de tipologías y dicho valor depende de la cantidad y el tipo a elegir y por ello la importancia de resaltar su valor individual para ser calculado según sea el caso. En el anexo 5: “Cálculo presupuesto de vivienda” se presenta un archivo tipo excel que describe los costos directos (estructura, cubierta, carpintería, instalaciones, acabados...), indirectos, interventoria, bioseguridad, transporte, entre otras actividades de cada uno de las tipologías planteadas en caso de requerir mayor detalle.

Tabla 114: Resumen de costo para viviendas por tipología

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR TOTAL
<i>VIVIENDAS</i>		
VISRT1	216	\$ 14.632.800.547
VISRL1	216	\$ 14.705.745.076
VISRA1	216	\$ 14.492.113.592
VISRC1	216	\$ 14.660.053.636
VISRC2	216	\$ 13.714.053.239
VISRU1	216	\$ 14.572.787.440

### 17.5. Infraestructura vial

En la Tabla 115 se presentan los valores totales de la infraestructura vial propuesta, la cual está basada en los valores referenciados de Proyectos Tipo y proyectos previos realizados por INVÍAS en Colombia. (<https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/hechos-de-transparencia/analisis-de-precio-unitarios>)

Es de resaltar....

Tabla 115: Resumen costo infraestructura vial

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR TOTAL
<i>VÍAS</i>		
Vías de tercer orden	0,463	\$ 385.306.659
Caminos peatonales	1212,66	\$ 229.042.265
Vías de tercer orden sin pavimentar	0,463	\$ 251.960.869
Caminos peatonales sin pavimentar	1212,66	\$ 157.353.610

### 17.6. Obras de Mitigación

En el capítulo de medidas de mitigación presentado al finalizar el estudio de detalle, se plantean una serie de soluciones técnicas e ingenieriles que ayudan a mitigar el daño que puedan causar la presencia de alguno de los fenómenos evaluados en el actual estudio y por ello se realiza la aproximación económica que se presentan en La Tabla 116.

El presupuesto que esta referenciado es a partir de un análisis de precios unitarios, realizado para cada uno de los departamentos de Colombia, el cual es recomendado por el Instituto Nacional de Vías y ajustados de acuerdo con las necesidades de cada obra. Se resalta que la mayoría de estas obras requiere las visitas de campo y estudios asociados para hacer los diseños finales, los cuales

no son contemplados en esta propuesta.

Para Los Monos se presentan 19 obras de mitigación que varían entre canales, drenes horizontales y Tuberías para el manejo de aguas, gaviones y modificación de geometrías para el control de laderas y revegetación para la protección del suelo.

Tabla 116: Resumen obra de mitigación

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR TOTAL
<i>OBRAS DE MITIGACIÓN</i>		\$ 314.925.084
Obra 1: estructural	1	\$ 37.914.010
Obra 2: manejo de aguas	1	\$ 1.843.653
Obra 3: manejo de aguas	1	\$ 1.078.047
Obra 4: manejo de aguas	1	\$ 24.574.980
Obra 5: manejo de aguas	1	\$ 6.740.584
Obra 6: manejo de aguas	1	\$ 4.729.251
Obra 7: manejo de aguas	1	\$ 10.268.904
Obra 8: modificación de geometrías	1	\$ 16.523.104
Obra 9: modificación de geometrías	1	\$ 9.725.639
Obra 10: modificación de geometrías	1	\$ 57.603.411
Obra 11: modificación de geometrías	1	\$ 17.017.022
Obra 12: revegetación	1	\$ 75.562.987
Obra 13: revegetación	1	\$ 3.083.779
Obra 14: revegetación	1	\$ 6.563.987
Obra 15: manejo de aguas	1	\$ 5.224.331
Obra 16: manejo de aguas	1	\$ 4.261.955
Obra 17: manejo de aguas	1	\$ 10.736.480
Obra 18: manejo de aguas	1	\$ 10.736.480
Obra 19: manejo de aguas	1	\$ 10.736.480

Para ampliar información técnica sobre dichas obras, referirse al capítulo de Obras de mitigación.

### 17.6.1. Tratamiento de agua

En el capítulo de viabilidad Sanitaria se presentaron las plantas de tratamiento de agua para el saneamiento del antiguo ETCR. Para el agua potable se tiene en cuenta bocatoma, desarenador, aducción y planta de tratamiento. Para aguas residuales, la planta de tratamiento y el alcantarillado de descarga. A continuación se presenta la tabla 117 con los valores totales para cada infraestructura, en caso de requerir mayor detalle en cantidades o especificaciones técnicas, se podrán consultar en el anexo 4 proyectos de agua.

Tabla 117: Resumen costo tratamiento de agua

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR TOTAL
PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS		\$ 4.868.181.786
Potable	1	\$ 3.305.504.053
Residual	1	\$ 1.562.677.733

### 17.7. Resumen presupuestal

Para finalizar el actual ejercicio presupuestal aproximado a las características propias del antiguo ETCR como su número de núcleos familiares, topografía, normativas y amenaza sin un diseño arquitectónico, se presenta La Tabla 237, la cual resume los costos globales de los elementos expuestos en este capítulo por tipología de vivienda aproximada teniendo como valor máximo la incorporación de todos los elementos de: 21441.418.249 correspondiente a la tipología VISRL1.

Tipología	Viviendas	Vías	Equipamientos	Obras de mitigación	Plantas de tratamiento	TOTALES
VISRT1	\$ 14.632.800.547	\$ 634.069.525	\$ 918.496.778	\$ 314.925.084	\$ 4.868.181.786	\$ 21.368.473.719
VISRL1	\$ 14.705.745.076	\$ 634.069.525	\$ 918.496.778	\$ 314.925.084	\$ 4.868.181.786	\$ 21.441.418.249
VISRA1	\$ 14.492.113.592	\$ 634.069.525	\$ 918.496.778	\$ 314.925.084	\$ 4.868.181.786	\$ 21.227.786.765
VISRC1	\$ 14.660.053.636	\$ 634.069.525	\$ 918.496.778	\$ 314.925.084	\$ 4.868.181.786	\$ 21.395.726.908
VISRC2	\$ 13.714.053.239	\$ 634.069.525	\$ 918.496.778	\$ 314.925.084	\$ 4.868.181.786	\$ 20.449.726.411
VISRU1	\$ 14.572.787.440	\$ 634.069.525	\$ 918.496.778	\$ 314.925.084	\$ 4.868.181.786	\$ 21.308.460.613

Figura 237: Costo total

**Parte VI**  
**Concepto**

## Capítulo 18

# Certificado de viabilidad

La Universidad Nacional de Colombia - sede Medellín en cumplimiento de las obligaciones del Contrato Interadministrativo No 752 de 2020, suscrito con el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, con el objeto de evaluar la viabilidad del antiguo Espacio Territorial de Capacitación y Reincorporación (ETCR) de Los Monos, de acuerdo con la información disponible y el estado del arte como se detalla en el documento técnico, concluye:

1. En términos de viabilidad jurídica se considera que la figura adecuada para la implantación de los proyectos de vivienda permanentes del ETCR Los Monos es Centro Poblado Rural, sin embargo los usos del suelo y las densidades de viviendas requeridas no permiten la incorporación del ETCR al Plan de Ordenamiento Territorial vigente. Razón por la cual, el procedimiento mas ágil, que no involucre la revisión y ajuste previa del POT, es la expedición de nueva normatividad que considere como caso excepcional los ETCR dentro del marco del Proceso de Paz, y permita la implantación del ETCR.
2. En términos de saneamiento básico la oferta hídrica disponible en las coordenadas en WGS84 -76,41719 X y 2,790648 (sistema Magna Bogotá 739782,1330 X y 800602,6902 y) de 28,1 l/s, con valores mínimos históricos de 9,6 l/s, abastece las demandas estimadas del ETCR para 438 viviendas, considerando un incremento de la población de 0,5 % anual. Esta captación requerirá procesos de potabilización cumpliendo los valores exigidos en la resolución 2115 del 2007. El tratamiento de potabilización se propone por el método coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección que ofrezca las condiciones de salud necesarias para la población. En cuanto al tratamiento de las aguas residuales se requiere un sistema reactor

anaerobio de flujo ascendente (UASB) +FAFA+ Clarificación secundaria.

3. El ETCR Los Monos cuenta con un área total de 4,46 ha; de las cuales 0,27 ha presentan amenaza alta por movimientos en masa. Estas áreas no son aptas para el desarrollo urbanístico del centro poblado rural que albergará la población de excombatientes de las FARC-EP ubicados en este predio. Del total del área de predio el 45,6 % corresponde a amenaza media, estas áreas podrán ser utilizadas para el desarrollo urbanístico siempre y cuando se ejecuten las obras de mitigación propuestas en el estudio de detalle, adicional a las obras y requerimientos que reglamenta la Ley, tal como la NRS-10. El área restante del predio 48,3 % presenta amenaza baja. Estas áreas son las mas recomendadas para la implantación del proyecto urbanístico; sin embargo las condiciones aptas que presentan estas zonas son dinámicas por lo tanto están sujetas al uso y manejo adecuado, tanto en la fase de construcción como de ocupación permanente de las viviendas, así como el cumplimiento de las normas que rigen, tal como la NSR-10.

En consecuencia:

4. Se considera desde el componente técnico de amenaza, normatividad y saneamiento que el antiguo ETCR Los Monos **ES VIABLE** para un desarrollo urbanístico que se ajuste a los lineamientos brindados en el presente estudio técnico de soporte.

## Parte VII

### Anexo

# Capítulo 19

## Anexos

En el desarrollo del actual convenio se ha realizado levantamiento de información, cálculos, revisión de documentos y construcción de especificaciones que se presentaran en carpetas anexas a este informe y se explican de manera general a continuación:

### **19.1. Anexo 1 Levantamiento topográfico**

Para dar cumplimiento al Decreto 1077 de 2015 para estudios de detalle escala 1:2.000 se realizo el levantamiento cartográfico bajo los estandares definidos por el IGAC. En en anexo 1 encontra:

1. Informe
2. Nube de Puntos
3. Ortofoto
4. Modelo Digital del Terreno (DTM)
5. Modelo Digital de Superficie (DSM)
6. Curvas de nivel
7. Fotocontrol

### **19.2. Anexo 2 Estudios subsuelo**

En la construcción del modelo geológico geotécnico que permite parametrizar las condiciones del antiguo ETCR y de esta manera fortalecer los modelos físicos. Se realizaron una serie de exploraciones directas e indirectas que apoyan este proceso y se adjuntan sus resultados de la siguiente manera en el anexo 2

1. Informe Linea sísmica
2. Registro de apiques
3. Registro perforaciones
4. Ensayo de consolidación
5. Corte CD
6. Densidad
7. Expansión
8. Gravedad Especifica
9. Hidrómetro
10. Humedades
11. Triaxial CU
12. Triaxial ciclico
13. Clasificación
14. Compresión simple
15. Informe PTAP - PTAR

### **19.3. Anexo 3 Documentos normativos**

Durante el estudio de la viabilidad normativa de cada uno de los antiguos antiguo ETCR se compilo y elaboro información que sirvió como insumo para los análisis presentados en el documento, los cuales se encuentran en esta anexo.

### **19.4. Anexo 4 Cálculos y estudios Agua**

En el estudio de viabilidad sanitaria se realizan una serie de estudios y cálculos que permitan realizar la correcta caracterización del recurso hídrico, análisis de alternativas para las PTAP y PTAR mencionados en el capítulo II y se anexan para mayor detalle de la siguiente manera:

1. Alternativas
2. Cálculos - especificaciones

3. Planos

4. proyectos de agua

### **19.5. Anexo 5 Cálculos presupuesto de vivienda**

En el capítulo de presupuesto se presenta el resumen de valores para la infraestructura futura tal como las vías, las viviendas, equipamientos y obras de mitigación, los cuales se presentan mejor discriminados en el archivo de cálculo acá presente.

En esta archivo Se tiene en cuenta cantidades particulares y APUs tomados del Departamento nacional de Planeación y el Instituto Nacional de Vías.

### **19.6. Anexo 6 Estándares Cartográficos**

Es el documento donde se mencionan las características y expone el como esta definida la estructura de la base de datos cartográfica del actual convenio para facilitar su comprensión y lectura.