

# 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 LA FILA

Un proyecto de:  
Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio

Ejecutado por:  
Universidad Nacional de Colombia - sede Medellín



9 de enero 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 Ramírez Sierra, 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>32</b>
1.1. Objeto . . . . .	32
1.2. Alcances . . . . .	33
1.3. Localización del área de estudio . . . . .	33
1.4. Evolución de la ocupación territorial . . . . .	34
1.4.1. Contexto geológico y geomorfológico . . . . .	35
1.5. Condiciones de lluvia del área de estudio . . . . .	39
1.5.1. Variación temporal . . . . .	39
1.5.1.1. Datos estaciones pluviométricas IDEAM . . . . .	39
1.5.1.2. Datos estimados por satélite CHIRPS . . . . .	47
1.5.2. Correlación IDEAM-Chirps . . . . .	49
1.5.3. Variación espacial . . . . .	51
1.6. Información secundaria . . . . .	52
1.6.1. Estudios previos . . . . .	52
1.6.2. Información Cartográfica . . . . .	54
<b>I Viabilidad Jurídica</b>	<b>61</b>
<b>2. Viabilidad Jurídica</b>	<b>62</b>
2.1. Antecedentes . . . . .	63
2.2. Viabilización del antiguo ETCR La Fila a la luz de la norma de ordenamiento territorial vigente . . . . .	65
2.2.1. Vigencias POT . . . . .	66
2.2.2. Procedimiento de revisión y ajuste de los POT . . . . .	68
2.2.2.1. Revisión Ordinaria del POT . . . . .	69
2.2.2.2. Modificación excepcional de norma urbanística	75

2.2.2.3.	Creación de un marco normativo excepcional para proyectos de vivienda y usos complementarios para el proceso de reincorporación . . . . .	79
2.2.2.4.	Posturas jurídicas frente a la revisión de los POT	81
2.2.3.	Caracterización y análisis general de la norma territorial del municipio de Icononzo . . . . .	86
2.2.3.1.	Análisis de tenencia antiguo ETCR La Fila . . . . .	86
2.2.3.2.	Caracterización general físico espacial . . . . .	89
2.2.3.3.	Norma general territorial aplicable al predio. . . . .	90
2.2.3.4.	Cálculo de aprovechamientos urbanísticos o intensidad en los usos del suelo. . . . .	96
2.3.	Conclusiones . . . . .	98

**II Viabilidad Sanitaria 111**

**3. Viabilidad Sanitaria 112**

3.0.1.	VARIABLES DEL DISEÑO . . . . .	112
3.0.2.	NORMATIVIDAD . . . . .	113
3.1.	PROYECCIÓN POBLACIONAL . . . . .	114
3.1.1.	Modelo de proyección de población . . . . .	115
3.2.	CAUDALES DE DISEÑO . . . . .	117
3.2.1.	Dotación de agua . . . . .	117
3.2.2.	Caudal de diseño sistema de tratamiento de agua potable	119
3.2.3.	Caudal de diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales . . . . .	120
3.2.4.	Oferta hídrica . . . . .	120
3.2.4.1.	Descripción de la fuente hídrica . . . . .	120
3.2.4.2.	Cálculo de la oferta . . . . .	122
3.2.4.3.	Cálculo de caudal ambiental . . . . .	128
3.2.4.4.	Disponibilidad hídrica . . . . .	130
3.3.	Caracterización y calidad de agua a tratar . . . . .	131
3.3.1.	Calidad de agua para consumo humano . . . . .	131
3.3.2.	Calidad de vertimiento para aguas residuales . . . . .	132
3.4.	Tratamiento de aguas crudas . . . . .	133
3.5.	Tratamiento de aguas residuales . . . . .	134
3.5.1.	Proceso aerobio . . . . .	134

3.5.2.	Proceso anaerobio . . . . .	135
3.5.3.	Proceso anóxico . . . . .	135
<b>4.</b>	<b>Metodología de Alternativas</b>	<b>137</b>
4.1.	Tipos de tratamiento de aguas . . . . .	138
4.2.	Alternativas de la PTAP . . . . .	139
4.2.1.	Alternativa 1. (Coagulación+ floculación+ sedimentación+ filtración, desinfección) . . . . .	139
4.2.2.	Alternativa 2 (Filtración directa + desinfección) . . . . .	140
4.2.3.	Alternativa 3. (Tanque de agua cruda + micro y ultra-filtración + desinfección) . . . . .	141
4.3.	Alternativas de la PTAR . . . . .	141
4.3.1.	Alternativa 1. (Lodos Activados + Sedimentación) . . . . .	141
4.3.2.	Alternativa 2 (UASB + FAFA+ Sedimentación) . . . . .	142
4.3.3.	Alternativa 3. (Laguna facultativa y/o anaerobia) . . . . .	143
4.4.	Matriz de decisión . . . . .	144
4.4.1.	Aplicabilidad del proceso . . . . .	145
4.4.2.	Generación de Residuos . . . . .	145
4.4.3.	Aceptación por parte de la Comunidad . . . . .	145
4.4.4.	Flexibilidad de la tecnología para adecuación a cumplimiento de cambio normativo . . . . .	145
4.4.5.	Vida útil . . . . .	146
4.4.6.	Requerimientos de Área . . . . .	146
4.4.7.	Costos . . . . .	146
4.4.8.	Diseño y Construcción . . . . .	146
4.4.9.	Operación . . . . .	146
4.4.10.	Entorno e Impacto al Medio Ambiente . . . . .	147
4.5.	Operación matriz de decisión . . . . .	147
4.5.1.	Ponderación de Rubros . . . . .	148
4.5.2.	Características cuantificables de Alternativas . . . . .	149
4.5.3.	Análisis de Información existente . . . . .	152
4.5.4.	Calificaciones Matriz PTAP . . . . .	153
4.5.5.	Calificaciones Matriz PTAR . . . . .	157
4.6.	Matriz de decisión y calificaciones . . . . .	162
4.6.1.	Matriz de decisión PTAP . . . . .	163
4.6.2.	Matriz de decisión PTAR . . . . .	164

4.7. Resultados y conclusiones . . . . .	165
<b>5. Captación y Aducción de agua cruda para tratamiento</b>	<b>167</b>
5.1. Captación . . . . .	167
5.2. Sistema de pretratamiento - Desarenador . . . . .	169
5.3. Conducción de agua cruda . . . . .	171
<b>6. Planta de Tratamiento de Agua Potable</b>	<b>173</b>
6.1. Diagrama de flujo de procesos . . . . .	175
6.2. Tren de tratamiento de aguas . . . . .	176
6.2.1. Dosificación de productos químicos para clarificación y desinfección . . . . .	176
6.2.1.1. Cálculo de la dosificación de coagulante . . . . .	176
6.2.1.2. Ajuste de pH y floculación . . . . .	177
6.2.1.3. Cálculo dosificación de desinfectante . . . . .	178
6.2.2. Floculador-Sedimentador de Manto de Lodos (FSML) . . . . .	178
6.2.3. Sistema de filtración . . . . .	180
6.2.4. Tanque de contacto . . . . .	182
6.2.5. Tanque de almacenamiento . . . . .	184
6.3. Tren de tratamiento de lodos . . . . .	185
6.3.1. Pozo de lodos . . . . .	186
6.3.2. Espesador hidráulico . . . . .	186
6.3.3. Lechos de secado . . . . .	186
6.4. Componentes generales . . . . .	189
6.4.1. Caseta de operación . . . . .	189
6.4.2. Vías y andenes dentro de la planta . . . . .	190
<b>7. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales</b>	<b>192</b>
7.1. Diagrama de flujo de procesos . . . . .	194
7.2. Tren de tratamiento de aguas . . . . .	195
7.2.1. Canal de entrada y pretratamiento . . . . .	195
7.2.2. Tanque de igualación de caudales . . . . .	196
7.2.3. Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente Mezcla Completa (UASB) . . . . .	197
7.2.4. Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA) . . . . .	199
7.2.5. Sedimentador secundario de alta tasa . . . . .	200
7.2.6. Canal de salida y aforo . . . . .	201

7.2.7.	Estructura de descarga . . . . .	202
7.3.	Tren de tratamiento de lodos . . . . .	202
7.3.1.	Deshidratación de lodos . . . . .	202
7.3.2.	Disposición de biosólidos . . . . .	204
7.4.	Componentes generales . . . . .	204
7.4.1.	Caseta de operación . . . . .	205
7.4.2.	Vías y andenes dentro de la planta . . . . .	206
7.4.3.	Alternativas de ubicación PTAR . . . . .	206

**III Viabilidad por Amenaza**

<i>Estudios Básicos de Amenaza</i>	<b>209</b>
------------------------------------	------------

**8. Amenaza por Movimientos en masa 210**

8.1.	Marco normativo de gestión del riesgo . . . . .	211
8.2.	Estudios previos . . . . .	213
8.3.	Definición del área de influencia para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa . . . . .	213
8.4.	Elaboración del inventario de movimientos en masa . . . . .	215
8.4.1.	Catalogo histórico de eventos . . . . .	215
8.4.2.	Procesos morfodinámicos . . . . .	217
8.5.	Evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa . . . . .	219
8.5.1.	Unidad de análisis y área mínima cartografiable . . . . .	222
8.5.2.	Variables predictoras . . . . .	222
8.5.2.1.	Inclinación de la ladera (IL) . . . . .	223
8.5.2.2.	Pendiente (S) . . . . .	223
8.5.2.3.	Relieve relativo (RR) . . . . .	223
8.5.2.4.	Rugosidad (Rug) . . . . .	223
8.5.2.5.	Índice de humedad topográfica (TWI) . . . . .	223
8.5.2.6.	Índice de posición topográfica (TPI) . . . . .	224
8.5.2.7.	Elevación relativa al cauce (EAS) . . . . .	224
8.5.2.8.	Distancia al drenaje siguiendo la pendiente (DDS) . . . . .	224
8.5.2.9.	Distancia a Fallas (DF) . . . . .	224
8.5.2.10.	Geología Superficial (Gs) . . . . .	224
8.5.2.11.	Evolución de las coberturas (Ec) . . . . .	224
8.5.2.12.	Cinemático (Cin) . . . . .	225
8.5.2.13.	Curvatura total (Cu) . . . . .	225

8.5.3.	Selección de variables y estimación de pesos por AHP . . .	225
8.5.4.	Descripción de variables y estimación de pesos de las clases	229
8.5.4.1.	Geología Superficial (Gs) . . . . .	230
8.5.4.2.	Evolución de las coberturas(Ec) . . . . .	237
8.5.4.3.	Relieve relativo (RR) . . . . .	245
8.5.4.4.	Pendiente (S) . . . . .	246
8.5.4.5.	Índice de distancia a las fallas (DF) . . . . .	248
8.5.4.6.	Cinemático (Cin) . . . . .	249
8.5.4.7.	Índice de humedad topográfica (TWI) . . . . .	251
8.5.4.8.	Curvatura (Cu) . . . . .	253
8.5.5.	Mapa de susceptibilidad con AHP y peso de la evidencia	257
8.5.6.	Modelo Regresión Logística . . . . .	258
8.5.7.	Evaluación de los modelos de susceptibilidad . . . . .	258
8.6.	Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia . . . .	260
8.6.1.	SHALSTAB . . . . .	260
8.7.	Amenaza por movimientos en masa detonados por sismo . . . .	264
8.7.1.	Sismicidad histórica . . . . .	264
8.7.2.	Metodología - Bloque deslizante de Newmark . . . . .	265
8.8.	Mapas de amenaza . . . . .	270
<b>9.</b>	<b>Amenaza por Inundaciones</b>	<b>277</b>
9.1.	Estudios previos . . . . .	277
9.2.	Definición del área de influencia para la evaluación de inundaciones	278
9.3.	Catalogo histórico de eventos . . . . .	278
9.4.	Estimación de caudales máximos . . . . .	279
9.4.1.	Tiempos de concentración . . . . .	279
9.4.2.	Curvas Intensidad - Duración - Frecuencia . . . . .	280
9.4.3.	Distribución temporal de la tormenta de diseño . . . . .	281
9.4.4.	Estimación de la infiltración . . . . .	282
9.4.5.	Hidrógrafa unitaria . . . . .	285
9.5.	Zonificación de manchas de inundación a escala de cuenca . . . .	286
<b>10.</b>	<b>Amenaza por Avenidas Torrenciales</b>	<b>292</b>
10.1.	Definición del área de influencia para la evaluación Avenidas To- rrenciales . . . . .	293
10.2.	Catalogo histórico de eventos . . . . .	293

10.3. Evaluación de la susceptibilidad por avenidas torrenciales a nivel de cuenca . . . . .	294
10.3.1. Análisis morfométrico . . . . .	294
10.3.1.1. Parámetros relacionados a la red de drenaje . . . . .	294
10.3.1.2. Parámetros relacionados a la geometría y forma de la cuenca. . . . .	296
10.3.1.3. Parámetros relacionados a la textura de la cuenca.	298
10.3.1.4. Parámetros relacionados al relieve de la cuenca . . . . .	301
10.3.2. Aporte de sedimentos . . . . .	315
10.4. Zonificación de manchas de avenidas torrenciales a escala de cuenca	315
<b>11. Definición de áreas con condición de amenaza o riesgo</b>	<b>322</b>
11.1. Ocupación Territorial . . . . .	322
11.1.1. Áreas con condición de amenaza (ACA) . . . . .	324
11.1.2. Áreas con condición de riesgo (ACR) . . . . .	326
11.2. Medidas no estructurales . . . . .	326
11.2.1. Recomendaciones específicas . . . . .	328
<b>IV Viabilidad por Amenaza</b>	
<i>Estudios de Detalle</i>	<b>329</b>
<b>12. Amenaza por Movimientos en masa</b>	<b>330</b>
12.1. Información cartográfica de detalle . . . . .	331
12.2. Geomorfología Local . . . . .	332
12.3. Morfodinámico . . . . .	335
12.4. Geología para ingeniería . . . . .	337
12.4.1. Exploración y parametrización geotécnica . . . . .	338
12.4.2. Unidades geológicas superficiales . . . . .	339
12.4.3. Prospección sísmica . . . . .	341
12.4.4. Análisis de laboratorio . . . . .	346
12.4.5. Zonas geotécnicas homogéneas . . . . .	349
12.5. TRIGRS . . . . .	352
12.5.1. Amenaza por movimientos en masa superficiales . . . . .	352
12.5.2. Modelo FOSM (First Order Second Moment) . . . . .	357
12.6. Scoops3D . . . . .	358
12.6.1. Modelo de estabilidad - Método Bishop simplificado . . . . .	362

12.6.2. Análisis sísmico . . . . .	364
12.6.3. Resultados . . . . .	366
12.7. Mapa de amenaza por movimiento en masa . . . . .	368
12.8. Análisis de estabilidad para sectores críticos . . . . .	370
12.8.1. Análisis de estabilidad para el corte C1-C2 . . . . .	373
12.8.2. Análisis de estabilidad para el corte C3 . . . . .	373
12.8.3. Análisis de estabilidad para el corte C4 . . . . .	375
12.8.4. Análisis de estabilidad para el corte C5 . . . . .	377
12.8.5. Análisis de estabilidad para el corte C6 . . . . .	378
12.8.6. Análisis de estabilidad para el corte C7 . . . . .	380
12.8.7. Análisis de estabilidad para el corte C8 . . . . .	383
12.8.8. Análisis de estabilidad para el corte C9 . . . . .	385
12.8.9. Análisis de estabilidad para el corte C10 . . . . .	386
<b>13. Amenaza por Inundaciones</b>	<b>392</b>
13.1. Descripción del modelo hidrodinámico bidimensional . . . . .	392
13.1.1. Caudales de simulación . . . . .	395
13.1.2. Rugosidad . . . . .	395
13.1.3. Condiciones de borde y condiciones iniciales . . . . .	396
13.2. Categorización de amenaza por inundación . . . . .	397
13.3. Resultados . . . . .	397
13.4. Amenaza final por inundaciones . . . . .	401
<b>14. Amenaza por Avenidas Torrenciales</b>	<b>405</b>
14.1. Metodologías . . . . .	405
14.1.1. Simulación hidrológica con IBER . . . . .	405
14.1.2. Simulación fluido-dinámica con <i>r.avaflow</i> . . . . .	406
14.2. Resultados . . . . .	408
14.2.1. Simulación hidrológica con IBER . . . . .	408
14.2.2. Simulación fluido-dinámica con <i>r.avaflow</i> . . . . .	409
14.3. Amenaza final por avenidas torrenciales . . . . .	409
<b>15. Vulnerabilidad</b>	<b>416</b>
15.1. Vulnerabilidad social . . . . .	416
15.1.1. Fragilidades socioeconómicas . . . . .	419
15.1.2. Capacidades sociales . . . . .	422
15.2. Vulnerabilidad física . . . . .	425

15.2.1. Vulnerabilidad por Movimientos en masa . . . . .	426
15.2.1.1. Fragilidad . . . . .	427
15.2.1.2. Intensidad . . . . .	431
15.2.1.3. Mapa de vulnerabilidad por movimientos en masa	434
15.2.2. Vulnerabilidad por Inundaciones . . . . .	435
15.2.2.1. Curvas de daño . . . . .	436
15.2.2.2. Mapa de vulnerabilidad por Inundación . . . .	438
15.2.3. Vulnerabilidad por avenidas torrenciales . . . . .	439
<b>16. Riesgo</b>	<b>443</b>
16.1. Riesgo actual . . . . .	444
16.2. Riesgo prospectivo . . . . .	446
16.3. Esquema de aproximación espacial . . . . .	446
16.3.1. Prototipo vivienda rural . . . . .	449
16.3.1.1. Evaluación de riesgo prospectivo . . . . .	449
16.4. Riesgo socioeconómico . . . . .	451
16.4.1. Matriz de riesgo . . . . .	452
<b>17. Medidas de mitigación y remediación</b>	<b>458</b>
17.1. Medidas no estructurales . . . . .	458
17.1.1. Umbrales de lluvia . . . . .	460
17.1.1.1. Umbrales de lluvia estaciones IDEAM escala dia-	
ria . . . . .	461
17.1.1.2. Umbrales de lluvia de satélite CHIRPS escala	
mensual . . . . .	463
17.1.1.3. Umbrales de lluvia como sistemas de alerta tem-	
prana (SAT) . . . . .	463
17.1.2. Estrategias para el aprovechamiento del suelo . . . . .	464
17.2. Medidas estructurales . . . . .	465
17.2.1. Obra N°1, 2, 3, 4 y 5 - Modificación geometría . . . . .	467
17.2.2. Obra N°6 - Trinchos . . . . .	469
17.2.3. Obra N°7 y 8 - Protección superficial . . . . .	470
17.2.4. Obra N°9 - Revegetación y reforestación . . . . .	470
17.2.5. Obra N°10 y 11 - Cuneta vía . . . . .	470
17.2.6. Obra N°12 - Canal escalonado . . . . .	471
17.2.7. Obra N°13 - Canal #1 . . . . .	472
17.2.8. Obra N°14 - Canal #2 . . . . .	472

17.2.9. Obra N°15 - Canal #3 . . . . .	473
17.2.10.Obra N°16 y 17 - Reforestación . . . . .	473
17.2.11.Obra N°18 - Subdrenes horizontales . . . . .	474
17.2.12.Obra N°19 - <i>Box culvert</i> . . . . .	475
<b>V Esquema de aproximación espacial</b>	<b>478</b>
<b>18.Esquema de aproximación espacial</b>	<b>479</b>
18.1. Planteamiento espacial . . . . .	479
18.1.1. Equipamientos . . . . .	482
18.1.2. Viviendas . . . . .	483
18.1.3. Infraestructura vial . . . . .	483
18.2. Borrador norma urbanística objeto de ajuste en Icononzo . . . . .	484
18.2.1. Componente general . . . . .	485
18.2.2. Componente rural . . . . .	486
18.3. Presupuesto . . . . .	491
18.3.1. Equipamientos . . . . .	491
18.3.2. Viviendas . . . . .	492
18.3.3. Infraestructura Vial . . . . .	492
18.3.4. Obras de Mitigación . . . . .	493
18.3.5. Tratamiento de agua . . . . .	493
18.4. Resumen presupuestal . . . . .	494
<b>VI Concepto</b>	<b>496</b>
<b>19.Concepto técnico de viabilidad</b>	<b>497</b>
<b>VII Anexo</b>	<b>499</b>
<b>20.Anexos</b>	<b>500</b>
20.1. Anexo 1 Levantamiento topográfico . . . . .	500
20.2. Anexo 2 Estudios subsuelo . . . . .	500
20.3. Anexo 3 Documentos normativos . . . . .	501
20.4. Anexo 4 Cálculos y estudios Agua . . . . .	501
20.5. Anexo 5 Cálculos presupuesto de vivienda . . . . .	502

20.6. Anexo 6 Estándares Cartográficos . . . . . 502

# Índice de figuras

1.	Ubicacion de los antiguos ETCR a nivel nacional . . . . .	31
2.	Localización del antiguo ETCR La Fila. . . . .	34
3.	Evolución de la ocupación. . . . .	35
4.	Mapa geológico 1:100.000 predio La Fila . . . . .	36
5.	Mapa litoestructural predio La Fila . . . . .	37
6.	Panorámica de prominencia topográfica ligeramente simétrica elongada . . . . .	38
7.	Panorámica de montículos y ondulaciones de origen denudacional (Dmo) . . . . .	38
8.	Panorámica de ladera de pendiente abrupta . . . . .	39
9.	Mapa geomorfológico 1:100.000 predio La Fila . . . . .	40
10.	Estaciones IDEAM cercanas al antiguo ETCR La Fila . . . . .	41
11.	Precipitación diaria multianual estación Granja La Hacienda . .	41
12.	Precipitación diaria multianual estación Ospina Perez . . . . .	42
13.	Precipitación diaria multianual estación Pandi . . . . .	42
14.	Precipitación mensual multianual para la estación Ospina Pérez, A)Valores medios, máximos y mínimos. B)Precipitación media mensual multianual para meses con ocurrencia del El Niño y La Niña . . . . .	43
15.	Precipitación mensual multianual para la estación Granja La Ha- cienda, A)Valores medios, máximos y mínimos. B)Precipitación media mensual multianual para meses con ocurrencia del El Niño y La Niña . . . . .	43
16.	Precipitación mensual multianual para la estación Pandi, A)Valores medios, máximos y mínimos. B)Precipitación media mensual mul- tianual para meses con ocurrencia del El Niño y La Niña . . . . .	44

17.	Precipitación anual multianual de la estación Ospina Perez, donde, las barras color rojo representan la ocurrencia de El Niño, el color azul La Niña y el gris periodos Neutros. . . . .	45
18.	Precipitación anual multianual de la estación Granja La Hacienda, donde, las barras color rojo representan la ocurrencia de El Niño, el color azul La Niña y el gris periodos Neutros. . . . .	46
19.	Precipitación anual multianual de la estación Pandi, donde, las barras color rojo representan la ocurrencia de El Niño, el color azul La Niña y el gris periodos Neutros. . . . .	46
20.	Precipitación diaria multianual estimación CHIRPS a nivel de cuenca . . . . .	48
21.	Precipitación mensual multianual CHIRPS a nivel de cuenca, A)Valores medios, máximos y mínimos. B)Precipitación media mensual multianual para meses con ocurrencia del El Niño y La Niña . . . . .	49
22.	Precipitación anual multianual CHIRPS sobre la cuenca D, donde, las barras color rojo representan la ocurrencia de El Niño, el color azul La Niña y el gris periodos Neutros. . . . .	49
23.	Correlación a escala diaria de la información dada por los pluviómetros del IDEAM y CHIRPS en las estaciones A)Ospina Pérez, B) Granja La Hacienda y C) Pandi. . . . .	50
24.	Correlación a escala mensual de la información dada por los pluviómetros del IDEAM y CHIRPS en las estaciones A)Ospina Pérez, B) Granja La Hacienda y C) Pandi. . . . .	50
25.	Correlación a escala anual de la información dada por los pluviómetros del IDEAM y CHIRPS en las estaciones A)Ospina Pérez, B) Granja La Hacienda y C) Pandi. . . . .	51
26.	Variación espacial de la A)Precipitación diaria media (PDMEd) y B)Precipitación diaria máxima (PDMax) . . . . .	52
27.	Variación espacial de la A)Precipitación mensual media (PDMEd), B)Precipitación mensual máxima (PDMax) y C)Precipitación mensual mínima (PDMin) . . . . .	53
28.	Imagen satelital representativa de la misión Sentinel 1 del año 2020. . . . .	56
29.	Imagen satelital representativa de la misión Sentinel 2 del año 2020. . . . .	57

30.	Imagen satelital representativa de la misión Landsat 8 del año 2015. . . . .	58
31.	Imagen satelital representativa de la misión Landsat 4 del año 1987. . . . .	59
32.	Proceso de creacion de los antiguos ETCR. . . . .	65
33.	Cronograma aproximado de ejecución para la revisión ordinaria del PBOT . . . . .	74
34.	Cronograma aproximado de ejecución para un escenario de modificación excepcional de norma urbanística . . . . .	77
35.	Cronograma aproximado para un escenario Ley . . . . .	80
36.	Clasificación Suelo en el antiguo ETCR La Fila (Municipio de Icononzo). Fuente: EOT. Plan Nacional de Restauración Ecológica (PNR). SIAC (REAA - MADS). . . . .	91
37.	Reserva Forestal en el antiguo ETCR La Fila (Municipio de Icononzo). Fuente: - Cartografía EOT - Municipio de Icononzo. Plan Nacional de Restauración Ecológica (PNR). SIAC (REAA - MADS). Cartografía Básica Digital Integrada. República de Colombia. Escala 1:25.000. IGAC. . . . .	93
38.	Área Neta Urbanizable en el antiguo ETCR La Fila (Municipio de Icononzo). Fuente: Cartografía EOT - Municipio de Icononzo.	98
39.	Centro Poblado de referencia El Trébol (Icononzo) . . . . .	108
40.	Cuenca del sitio de captación . . . . .	121
41.	Sitio de captación para el antiguo ETCR La Fila . . . . .	122
42.	Cuenca e información hidroclimática empleada para la calibración del modelo . . . . .	123
43.	Esquema de funcionamiento del modelo . . . . .	125
44.	CDC entre la serie estimada y la observada . . . . .	128
45.	Serie de caudal estimada y observada . . . . .	129
46.	Serie de caudal sintética microcuenca abastecedora . . . . .	129
47.	Curva de duración de caudales - microcuenca abastecedora . . . . .	129
48.	Ciclo anual de caudales en año medio para microcuenca abastecedora . . . . .	131
49.	Balance de masas. . . . .	138
50.	Tren tratamiento PTAP Alternativa 1. . . . .	140
51.	Tren tratamiento PTAP Alternativa 2. . . . .	140

52.	Tren tratamiento PTAP Alternativa 3. . . . .	141
53.	Tren tratamiento PTAR Alternativa 1. . . . .	142
54.	Tren tratamiento PTAR Alternativa 2. . . . .	143
55.	Tren tratamiento PTAR Alternativa 3. . . . .	144
56.	Calidad de la fuente. . . . .	153
57.	Matriz de decisión PTAP. . . . .	163
58.	Matriz de decisión PTAR. . . . .	164
59.	Esquema 3D de la PTAP. . . . .	174
60.	Diagrama de flujo de procesos en la PTAP. . . . .	175
61.	Esquema Floculador Sedimentador de Manto de Lodos (FSML). . . . .	179
62.	Esquema del filtro en arena. . . . .	181
63.	Esquema Tanque de contacto. . . . .	183
64.	Esquema Tanques de almacenamiento. . . . .	184
65.	Esquema del espesador hidráulico. . . . .	187
66.	Esquema de los lechos de secado. . . . .	188
67.	Estratificación de la estructura del lecho de secado (medidas en metros). . . . .	188
68.	Vista en planta de la distribución propuesta en la PTAP. . . . .	189
69.	Esquema 3D de la PTAR. . . . .	193
70.	Diagrama de flujo de procesos en la PTAR. . . . .	194
71.	Canal de entrada y pretratamiento de las aguas residuales. . . . .	195
72.	Esquema del reactor UASB. . . . .	198
73.	Esquema del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA). . . . .	199
74.	Modelo del Sedimentador Secundario con paneles de tasa alta. . . . .	200
75.	Esquema de los lechos de secado. . . . .	203
76.	Estratificación de la estructura del lecho de secado (medidas en metros). . . . .	204
77.	Vista en planta de la distribución propuesta en la PTAR. . . . .	205
78.	Alternativas de ubicación adicional para PTAR . . . . .	207
79.	a)Mapa de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC. b)Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC. . . . .	214
80.	Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa EOT Icononzo, 2007 . . . . .	215
81.	Localización del área de estudio del antiguo ETCR La Fila . . . . .	216

82.	Distribución espacial de movimientos en masa en el municipio de Icononzo registrados en el catálogo SIMMA . . . . .	218
83.	Clasificación utilizada en la identificación de procesos morfo-dinámicos . . . . .	219
84.	Inventario procesos morfodinámicos La Fila . . . . .	220
85.	Histograma de frecuencia de Kernel con la densidad de probabilidad para las variables continuas analizadas . . . . .	226
86.	Matriz de correlación . . . . .	227
87.	Mapa de Unidades Geológicas Superficiales Predio La Fila . . .	231
88.	Suelo Residual (IB) de Formación Guadalupe (Ksg) . . . . .	232
89.	Saprolito (IC) de Formación Guadalupe (Ksg) . . . . .	233
90.	Roca Alterada IIB (Parcialmente Meteorizada . . . . .	233
91.	Roca Alterada IIB (Parcialmente Meteorizada . . . . .	233
92.	Suelo Residual (IB) de Formación Seca (KPgs) . . . . .	234
93.	Saprolito (IC) de Formación Seca (KPgs) . . . . .	235
94.	Roca parcialmente meteorizada (IIB) . . . . .	235
95.	Roca parcialmente meteorizada (IIB) . . . . .	236
96.	Afloramiento de matriz heterogénea de Depósito de Vertiente . .	237
97.	Panoramica superficial de Depósito de Vertiente . . . . .	237
98.	Panoramica superficial de Depósito de Vertiente con bloques de composición (KPgs) . . . . .	238
99.	Coberturas actuales. . . . .	238
100.	Índice vegetación normalizado La Fila Periodo 2001-2003, 2013-2015 . . . . .	240
101.	Representación estadística NDVI La Fila . . . . .	241
102.	Tonalidades resultantes de combinación NDVI multitemporal .	241
103.	Representación multitemporal NDVI . . . . .	242
104.	Evolución de las coberturas multitemporal. . . . .	243
105.	Evolución de las coberturas. . . . .	245
106.	Cambio coberturas año 2015-2020 . . . . .	246
107.	Mapa de índice de relieve relativo para el antiguo ETCR La Fila	248
108.	Mapa de índice de Pendiente para el antiguo ETCR La Fila . .	249
109.	Mapa del Índice de distancia a las fallas, antiguo ETCR La Fila	250
110.	Clasificación cinemática de laderas. . . . .	252
111.	Mapa de índice de humedad topográfica para el antiguo ETCR La Fila . . . . .	254

112. Mapa de Curvatura Perfil y Plana antiguo ETCR La Fila . . . . .	255
113. Mapa de Curvatura, antiguo ETCR La Fila . . . . .	256
114. Gráfica de clases de geoformas por su porcentaje en área del antiguo ETCR La Fila . . . . .	256
115. Susceptibilidad continua por movimientos en masa. . . . .	257
116. Susceptibilidad continua por movimientos en masa. . . . .	259
117. Area bajo la curva para el método AHP y peso de la evidencia	260
118. Area bajo la curva para el método regresión logística . . . . .	260
119. Susceptibilidad final por movimientos en masa. . . . .	261
120. Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 10 años. . . . .	265
121. Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 100 años. . . . .	266
122. Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 500 años. . . . .	267
123. Bloque deslizante método de Newmark . . . . .	267
124. Amenaza por movimientos en masa detonados por sismo. a) Escenario #1 condición seca. b) Escenario #2 condición saturada. .	271
125. Mapa de amenaza pro movimiento en masa . . . . .	272
126. Cuencas La Fila . . . . .	279
127. Ubicación de Estaciones pluviográficas . . . . .	281
128. Curvas IDF: (a) Cuenca La Laja, (b) Cuenca Mogollas y (c) Cuenca La Lajita . . . . .	282
129. Diagrama de Huff para grupo de tormentas II . . . . .	283
130. Hietograma de precipitación de diseño Cuenca La Laja Tr=100 años . . . . .	283
131. Descripción HAND, fuente: (Rennó y cols., 2008) . . . . .	286
132. HAND cuenca La Laja . . . . .	287
133. HAND cuenca Mogollas . . . . .	288
134. HAND cuenca La Lajita . . . . .	288
135. Ejemplo - calado cuenca La Laja . . . . .	289
136. Zonificación de amenaza por inundación . . . . .	290
137. Diagrama conceptual de la evaluación de la amenaza por avenidas torrenciales. . . . .	293
138. Cuencas La Fila . . . . .	294

139. Cambio de forma de la curva hipsométrica con la edad del río.  
 Fuente: Elaboración propia . . . . . 303

140. Curva hipsométrica e histograma altimétrico de la Q. La Laja. . 307

141. Perfil longitudinal de la Q. La Laja . . . . . 307

142. Curva hipsométrica e histograma altimétrico de la Q. Mogollas . 307

143. Perfil longitudinal de la Q. Mogollas. . . . . 308

144. Curva hipsométrica e histograma altimétrico de la Q. La Lajita 308

145. Perfil longitudinal de la Q. La Lajita. . . . . 308

146. Umbrales de Wilford, Sakals, Innes, Sidle, y Bergerud (2004)  
 aplicados para el antiguo ETCR La Fila. . . . . 313

147. Comparación de variables con Rh para el ETCR La Fila. . . . . 314

148. Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia corres-  
 pondiente al periodo de retorno de 10 años. . . . . 316

149. Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia corres-  
 pondiente al periodo de retorno de 100 años. . . . . 317

150. Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia corres-  
 pondiente al periodo de retorno de 500 años. . . . . 318

151. Zonificación de amenaza por avenidas torrenciales . . . . . 319

152. Ocupación territorial . . . . . 323

153. Levantamiento Construcciones . . . . . 324

154. Zonas en condición de amenaza para el predio del antiguo ETCR. 325

155. Zonas en condición de riesgo para el predio del antiguo ETCR. . 327

156. Resultado del trabajo realizado con LIDAR, Elaborado con el  
 software *Quick Terrain Reader* v 8.2.0 . . . . . 332

157. Ortofotografía antiguo ETCR La Fila, Icononzo, Tolima . . . . . 333

158. Modelo digital de terreno(DTM), antiguo ETCR La Fila, Ico-  
 nonzo, Tolima . . . . . 333

159. Mapa Geomorfológico local . . . . . 334

160. LaMcl-Ladera abrupta moderada cóncava lisa, Lomp-Loma muy  
 baja plana, Lalcl-Ladera abrupta larga cóncava lisa, Lalxr-Ladera  
 abrupta larga convexa rugosa . . . . . 336

161. Lomr-Loma muy baja redondeada, Lacxl-Ladera abrupta corta  
 convexa lisa, Loba-Loma baja aguda . . . . . 336

162. Proceso activo producto de la extracción del suelo como material  
 de construcción . . . . . 337

163. Proceso activo producto de la extracción del suelo como material de construcción . . . . . 337

164. Proceso activo de encharcamiento y socavación . . . . . 338

165. Proceso activo de encharcamiento y socavación . . . . . 338

166. Procesos Morfodinámicos en el antiguo ETCR La Fila . . . . . 339

167. Mapa procesos morfodinámicos antiguo ETCR La Fila . . . . . 340

168. Ubicación exploración ejecutada . . . . . 341

169. 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  $1,5m$ . . . . . 342

170. Mapa de unidades geológicas superficiales (UGS) en el antiguo ETCR La Fila. Depósitos Antrópicos (Qll), Suelo Residual VI-Formación Seca (KPgs) . . . . . 343

171. Suelo Residual VI Formación Seca (KPgs-sr) . . . . . 344

172. Lente de material arenoso suelo residual VI KPgs . . . . . 345

173. Depósitos Antrópicos en el antiguo ETCR La Fila . . . . . 346

174. Esquema ensayo de refracción sísmica (ASTM, 2011) . . . . . 346

175. Perfil 2D  $V_s$  línea 1 . . . . . 347

176. Perfil 2D  $V_s$  línea 2 . . . . . 347

177. Variabilidad en los límites de consistencia de la zona 1 mediante la Carta de plasticidad de Casagrande. . . . . 352

178. Esquema metodológico de la evaluación de amenaza empleando TRIGRS como modelo de amenaza. Adaptado de van Westen, Castellanos, y Kuriakose (2008) . . . . . 353

179. Condiciones hidrológicas en los estratos superficiales del suelo. Adaptado de Baum, Savage, Godt, y (U.S.) (2008) . . . . . 354

180. Amenaza por movimientos en masa tipo planar- a) Escenario  $Tr=10$  años parcialmente saturado . . . . . 359

181. Amenaza por movimientos en masa tipo planar- Escenario  $Tr=10$  años saturado . . . . . 359

182. Amenaza por movimientos en masa tipo planar- Escenario  $Tr=100$  años parcialmente saturado . . . . . 360

183. Amenaza por movimientos en masa tipo planar- Escenario  $Tr=100$  años saturado . . . . . 360

184. a) Matriz de análisis Scoops3D (Reid, Christian, Brien, y Henderson, 2015). b) Capas de entrada . . . . . 361

185. a) Diagrama 3D del análisis de estabilidad (Reid y cols., 2015). b) Diagrama de fuerzas sobre columna típica (Zhang y Wang, 2019) . . . . . 363

186. Espectro elástico de aceleraciones en superficie, amortiguamiento del 5 % (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010) . . 364

187. Coeficiente de amplificación  $F_a$  del suelos para periodos cortos del espectro (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010) 365

188. Amenaza por movimientos en masa tipo circular a) Escenario 1 estado seco b) Escenario 2 estado seco y fuerza sísmica c) Escenario 3 nivel de agua alto d) Escenario 4 nivel de agua alto y fuerza sísmica . . . . . 367

189. Amenaza por movimientos en masa tipo planar . . . . . 368

190. Amenaza por movimientos en masa tipo circular . . . . . 369

191. Ajuste heurístico . . . . . 370

192. Amenaza por movimientos en masa . . . . . 371

193. Mapa de las unidades de ladera y los cortes realizados para antiguo ETCR La Fila . . . . . 372

194. Perfil del corte C4 para escenarios más críticos con elaboración de terrazas y disminución del nivel freático para estabilizar la ladera . . . . . 377

195. Perfil del corte C6 para escenarios más críticos con elaboración de terrazas para estabilizar la ladera . . . . . 381

196. Perfil del corte C7 con anclajes. . . . . 383

197. Perfil del corte C8 con disminución del nivel freático. . . . . 385

198. Perfil del corte C10 para escenarios más críticos con propuesta de terrazas . . . . . 388

199. Procedimiento para zonificación de amenaza por inundación . . 393

200. Corrientes antiguo ETCR La Fila . . . . . 394

201. Categorización de amenaza por inundaciones . . . . . 397

202. Distribución espacial del calado . . . . . 398

203. Distribución espacial de la velocidad . . . . . 399

204. Nivel de amenaza por inundación . . . . . 400

205. Zonificación de amenaza por inundaciones ajustada geomorfológicamente. . . . . 402

206. Zonificación final de amenaza por inundaciones. . . . .	403
207. Zonificación de amenaza por avenida torrencial según el modelo hidrológico. . . . .	408
208. Simulación de la avenida torrencial de una fase con concentración de sólidos de 80 %. . . . .	410
209. Simulación de la avenida torrencial de una fase con concentración de sólidos de 60 %. . . . .	411
210. Simulación de la avenida torrencial de dos fases con concentración de sólidos de 40 %. . . . .	412
211. Zonificación de amenaza por avenidas torrenciales. . . . .	413
212. Zonificación final de amenaza por avenidas torrenciales. . . . .	414
213. Fragilidad social y económica antiguo ETCR . . . . .	419
214. Capacidades antiguo ETCR . . . . .	423
215. Planos módulos actuales de vivienda "Galpones" (Barreto, 2019). . . . .	430
216. Estructuras encontradas en el antiguo ETCR. (a) Módulos de vivienda, (b) Escuela, (c) Biblioteca, (d) Guardería . . . . .	431
217. Mapas de propagación por movimientos en masa en el antiguo ETCR de La Fila. . . . .	433
218. Vulnerabilidad por movimientos en masa en el antiguo ETCR de La Fila . . . . .	435
219. Funciones de daño según la profundidad de inundación en construcciones residenciales bajo diferentes materiales (material mixto, MIX; madera, WOD; mampostería, MAS; concreto, CON; acero/metál, MET). Adaptado de J, L, y Orellana (2020). . . . .	437
220. Daño por inundación en el antiguo ETCR La Fila . . . . .	439
221. Daño por avenidas torrenciales en el antiguo ETCR de La Fila. . . . .	440
222. Elementos actuales dentro del antiguo ETCR La Fila. . . . .	445
223. Propuesta predios para viviendas . . . . .	447
224. Viviendas guías . . . . .	448
225. Prototipo vivienda rural proyectada . . . . .	449
226. Mapas de propagación por movimientos en masa, escenario prospectivo en el antiguo ETCR La Fila. . . . .	453
227. Vulnerabilidad por movimientos en masa de viviendas proyectadas en el antiguo ETCR La Fila . . . . .	454

228. Daño por inundación en viviendas proyectadas en el antiguo ETCR La Fila . . . . .	454
229. Vulnerabilidad por avenidas torrenciales en viviendas proyectadas en el antiguo ETCR La Fila . . . . .	455
230. Viviendas proyectadas dentro del antiguo ETCR La Fila . . . . .	455
231. . . . .	456
232. Umbral de lluvia estación La Granja IDEAM . . . . .	462
233. Umbral de lluvia estación Ospina Perez IDEAM . . . . .	462
234. Umbral de lluvia estación Pandi IDEAM . . . . .	463
235. Umbral de lluvia para satélite CHIRPS cuenca La Laja . . . . .	464
236. Ubicación obras de mitigación y remediación . . . . .	466
237. Modificación de geometría de taludes (Suárez, 2001) . . . . .	467
238. Protección con biomantos . . . . .	468
239. Esquema trinchos . . . . .	469
240. Distribución obras . . . . .	469
241. Geosintético permanente tipo TRM (Prodalam, 2020) . . . . .	470
242. Cuneta vía (Secretaría de infraestructura física departamento de Antioquia, 2019) . . . . .	471
243. Canal escalonado(Suárez, 2001) . . . . .	471
244. Esquema Canal #1 . . . . .	472
245. Canal #2(Suárez, 2001) . . . . .	473
246. Sección canal revestido en suelo-cemento (Suárez, 2001) . . . . .	473
247. (Suárez, 2001) . . . . .	474
248. Esquema uso de subdrenes horizontales (Suárez, 2009) . . . . .	475
249. Esquema de sección transversal y frontal de <i>box culvert</i> para el antiguo ETCR La Fila . . . . .	476
250. Restricciones normativas . . . . .	480
251. Evaluación de amenazas . . . . .	481
252. Propuesta de predios . . . . .	484
253. Propuesta infraestructura vial . . . . .	485
254. Costo total . . . . .	495

# Índice de tablas

1.	Estaciones pluviométricas del IDEAM cercanas al antiguo ETCR La Fila. . . . .	40
2.	Análisis de la propiedad al inmueble Panorama. . . . .	86
3.	Norma urbanística general para el suelo rural. Fuente: EOT. . .	96
4.	Propuesta general de modificación e incorporación de artículos revisión EOT. . . . .	102
5.	Información Centro Poblado de referencia . . . . .	108
6.	Cálculo de densidad del Centro Poblado de referencia . . . . .	109
7.	Proyección poblacional para los años establecidos en el periodo de diseño . . . . .	116
8.	Usos del agua en viviendas. . . . .	118
9.	Volumen de subsistencia para el antiguo ETCR de estudio. . . .	119
10.	Porcentaje de uso de agua de los proyectos productivos en el antiguo ETCR. . . . .	119
11.	Características de la fuente abastecedora para antiguo ETCR La Fila . . . . .	121
12.	Parámetros calibrados para el modelo de tanques . . . . .	128
13.	Caudal ambiental microcuenca abastecedora . . . . .	130
14.	Disponibilidad hídrica año seco y año medio para la microcuenca	131
15.	Caracterización de agua cruda según el grado de polución de la fuente (de Desarrollo Economico, 2000). . . . .	132
16.	Composición típica agua residual doméstica (Metcalf, Eddy, y Tchobanoglous, 1979). . . . .	133
17.	Ponderación de factores según criterios . . . . .	149
18.	Cálculos alternativas PTAP . . . . .	149
19.	Cálculos alternativas PTAR . . . . .	150

20.	Composición típica agua residual doméstica . . . . .	152
21.	Calificaciones de PTAP . . . . .	153
22.	Calificaciones de PTAR . . . . .	158
23.	Procesos de remoción de parámetros del agua cruda. . . . .	176
24.	Dosificación de coagulante. . . . .	177
25.	Dosificación desinfectante en la PTAP. . . . .	178
26.	Dimensiones del FSML. . . . .	180
27.	Dimensiones del filtro propuesto. . . . .	182
28.	Dimensiones del tanque de contacto. . . . .	183
29.	Dimensiones del tanque de almacenamiento. . . . .	184
30.	Tiempo de vaciado del tanque. . . . .	185
31.	Concentración de parámetros en el agua de salida de la planta. . . . .	202
32.	Procesos morfodinámicos La Fila - Zona D . . . . .	219
33.	Escala de importancia relativa. modificada de . . . . .	221
34.	Escala de importancia relativa. modificada de (Saaty, 1980) . . . . .	228
35.	Matriz de calificación AHP . . . . .	229
36.	Pesos de las variables . . . . .	229
37.	Unidades geológicas presentes en el área de influencia para la evaluación de amenaza en el antiguo ETCR La Fila . . . . .	236
38.	Evolución de cobertura del antiguo ETCR La Fila . . . . .	247
39.	Categorías de la variable Relieve Relativo. . . . .	247
40.	Categorías de la variable Pendiente. . . . .	247
41.	Tabla del Índice de distancia a las fallas, antiguo ETCR La Fila . . . . .	249
42.	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). . . . .	251
43.	Índice de humedad topográfica. . . . .	253
44.	Rangos de las formas del terreno. . . . .	254
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. . . . .	255
46.	Mapa de susceptibilidad final La Fila. . . . .	260
47.	Parámetros geotécnicos para las unidades geológicas superficiales. . . . .	264
48.	Escenarios de lluvia establecidos para periodos de retorno (Tr) de 10, 100 y 500 años. . . . .	264

49.	Parámetros geotécnicos para las unidades geológicas superficiales.	270
50.	Expresiones para calcular el tiempo de concentración . . . . .	280
51.	Tiempos de concentración . . . . .	280
52.	Estimación del número de curva de la cuenca La Laja . . . . .	284
53.	Estimación del número de curva de la cuenca Mogollas . . . . .	284
54.	Estimación del número de curva de la cuenca La Lajita . . . . .	284
55.	Parámetros de pérdidas por infiltración . . . . .	284
56.	Caudales máximos para diferentes tiempos de retorno de la cuenca La Laja . . . . .	285
57.	Caudales máximos para diferentes tiempos de retorno de la cuenca Mogollas . . . . .	285
58.	Caudales máximos para diferentes tiempos de retorno de la cuenca La Lajita . . . . .	285
59.	Características de la cuenca de acuerdo con el valor $F_f$ . . . . .	297
60.	Características de la cuenca de acuerdo con el valor de $C_c$ . . . . .	298
61.	Características de la cuenca de acuerdo con el valor $F_s$ . . . . .	299
62.	Características de la cuenca de acuerdo con el valor $D_d$ . . . . .	299
63.	Características de la cuenca de acuerdo con el valor $L_g$ . . . . .	301
64.	Distribución del número de robustez. . . . .	302
65.	Límites de clases para procesos hidrogeomorfológicos relacionados con el índice de Melton (Wilford y cols., 2004). . . . .	303
66.	Parámetros morfométricos de la cuenca utilizados para la evaluación de torrencialidad . . . . .	305
67.	Índices morfométricos para la evaluación de la torrencialidad de las Cuencas del antiguo ETCR La Fila-Icononzo . . . . .	306
68.	Cálculo de caudal total para avenidas torrenciales . . . . .	318
69.	Clasificación perfiles del suelo a partir de Tabla A.2.4.4 NSR-10 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010) . . . . .	343
70.	Perfil de suelo . . . . .	348
71.	Distribución ensayos de laboratorio . . . . .	348
72.	Recopilación de parámetros obtenidos mediante ensayos de laboratorio . . . . .	349
73.	Parámetros geotécnicos para la unidad geológica superficial . . . . .	351
74.	Parámetros hidráulicos empleados en la condición parcialmente saturada para las zonas geotécnicas homogéneas. . . . .	356

75.	Intensidades de Lluvia . . . . .	356
76.	Valores medios y porcentaje de variación para el modelo FOSM (Assis, Espósito, Gardoni, Silva, y Maia, 2012) . . . . .	358
77.	Parámetros geotécnicos para análisis en Scoops3D. . . . .	362
78.	Porcentaje de área de $FS$ por escenario evaluado . . . . .	366
79.	Porcentaje de mapa de amenaza por movimientos en masa . . . . .	369
80.	Resultados de Slide para C1 y escenario más critico . . . . .	374
81.	Resultados de Slide para C3 y escenario más critico . . . . .	375
82.	Resultados de Slide para C4 y escenario más critico . . . . .	376
83.	Resultados de Slide para C5 y escenario más critico . . . . .	379
84.	Resultados de Slide para C6 y escenario más critico . . . . .	380
85.	Resultados de Slide para C7 y escenario más critico con sismo y sin sismo . . . . .	382
86.	Resultados de Slide para C8 y escenario más critico con sismo y sin sismo. . . . .	384
87.	Resultados de Slide para C9 y escenario más critico con sismo y sin sismo. . . . .	386
88.	Resultados de Slide para C10 y escenario más critico . . . . .	387
89.	Caudales de simulación - inundaciones . . . . .	395
90.	Valores de referencia para coeficiente de rugosidad de Manning .	396
91.	Parametrización del modelo . . . . .	407
92.	Esquema elementos para establecer la vulnerabilidad . . . . .	420
93.	Escala de valoración . . . . .	421
94.	Escala de valoración . . . . .	424
95.	Factores de fragilidad por tipología de estructuras . . . . .	427
96.	Factor de fragilidad por altura de la edificación . . . . .	428
97.	Factores de fragilidad por estado de conservación de la edificación	428
98.	Factor de fragilidad por edad de la edificación . . . . .	429
99.	Vida útil en función del tipo de edificación . . . . .	429
100.	Factores de fragilidad de las estructuras. . . . .	430
101.	Presión límite o de falla, según tipo de estructuras. Fuente:(SGC, 2015) . . . . .	434
102.	Parámetro de intensidad por presión del impacto ( $I_{f-pre}$ ). Fuente:(SGC, 2015) . . . . .	434

103. Parámetro de intensidad según la profundidad del deslizamiento y la altura de las edificaciones. Fuente:SGC (2015) . . . . . 434

104. Funciones de daño según categorías de construcción y valores para los materiales de las estructuras. Donde  $h$ =profundidad de inundación y  $mf$ =factor de material. . . . . 436

105. Categoría y tipos de material para diferentes elementos de construcción . . . . . 437

106. Factores en la implementación de la metodología para las estructuras antiguo ETCR La Fila. . . . . 438

107. Probabilidad espacial de la amenaza por movimientos en masa . 444

108. Pérdidas Esperadas Anuales (PEA) del escenario actual de algunas viviendas expuestas del antiguo ETCR La Fila. . . . . 446

109. Factores de fragilidad de las estructuras. . . . . 450

110. Pérdidas Esperadas Anuales (PEA) del escenario proyectado de algunas viviendas expuestas en el antiguo ETCR La Fila . . . . 451

111. . . . . 452

112. Áreas aprovechamiento del suelo . . . . . 465

113. Parámetros *box culvert* proyectado . . . . . 476

114. influencia de instituciones educativas y unidades productivas . . 482

115. uso del suelo . . . . . 488

116. Uso con áreas mínimas y máximas . . . . . 488

117. Densidad habitacional . . . . . 489

118. Cesiones urbanísticas . . . . . 489

119. Resumen costo equipamientos . . . . . 492

120. Resumen de costo para viviendas por tipología . . . . . 492

121. Resumen costo infraestructura vial . . . . . 493

122. Resumen obra de mitigación . . . . . 494

123. Resumen costo tratamiento de agua . . . . . 494

## 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, 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. Desde el principio se consideró que el término de dicho plazo no representaría la desaparición o desalojo de los 24 Espacios habitados por los excombatientes y sus familias. Por lo que el Gobierno puso en marcha una estrategia para la transición de algunas de estas zonas que presentan dificultades de permanencia en los actuales territorios, debido a riesgos por fenómenos de origen natural, limitaciones en vías de acceso y en la provisión de servicios públicos, entre otros factores, y de consolidación para las otras zonas.

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 antiguos 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 La Fila, localizado en el departamento de Tolima. El 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.

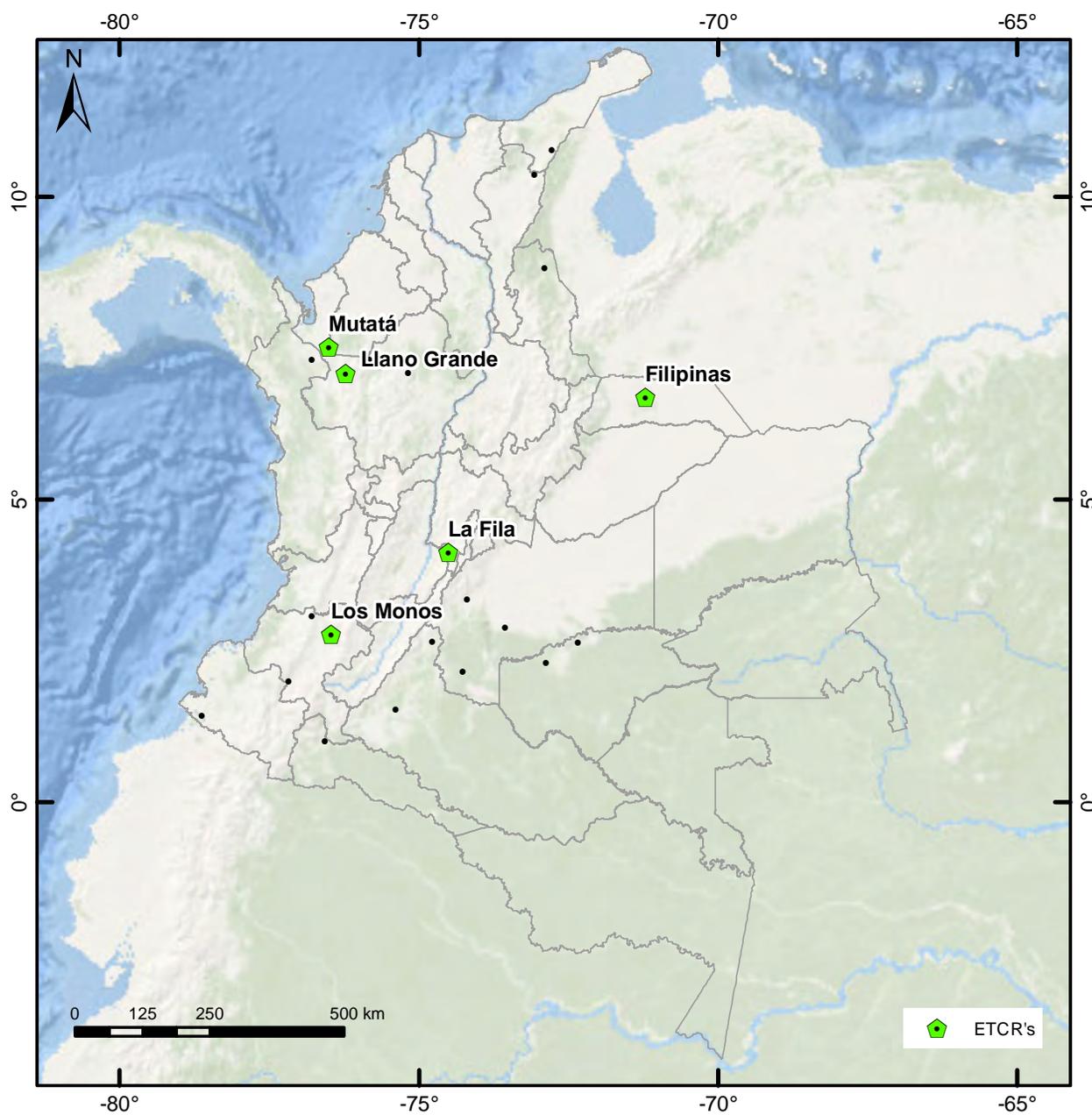


Figura 1: Ubicacion de los antiguos ETCR a nivel nacional

# 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, 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 antiguos 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 antiguos 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 presente estudio apunta a la viabilidad en términos jurídicos, de amenaza por fenómenos naturales y disponibilidad de recurso hídrico del antiguo ETCR La Fila. Para establecer dicha viabilidad se elaboran 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 La Fila se encuentra en el municipio de Icononzo, ubicado al oriente del departamento del Tolima, como parte de la región del Sumapaz (Figura 2). Dicho municipio limita al sur con los municipios de Villarrica y Cunday, al norte con los municipios de Fusagasugá y Pandi del departamento de Cundinamarca, al occidente con Melgar y al oriente con los municipios de Venecia y Cabrera del departamento de Cundinamarca.

El municipio tienen un área de 23,886 hectáreas, con una temperatura media de 21°C. En la zona rural consta de 32 veredas. Su economía es agrícola por excelencia, basada en el cultivo de café contando con una explotación tecnificada gracias a la asistencia que presta la Federación Nacional de Cafeteros, también tiene una importancia relevante el cultivo de banano y otros frutales como naranja, mandarina, guayaba y aguacate. También se presenta actividad ganadera con razas vacunas como el cebú, gir, hoster, entre otros.

El municipio de Icononzo presenta una poca actividad minera localizada en la mina de carbón ubicada en la vereda de Parroquia Vieja. La actividad minera

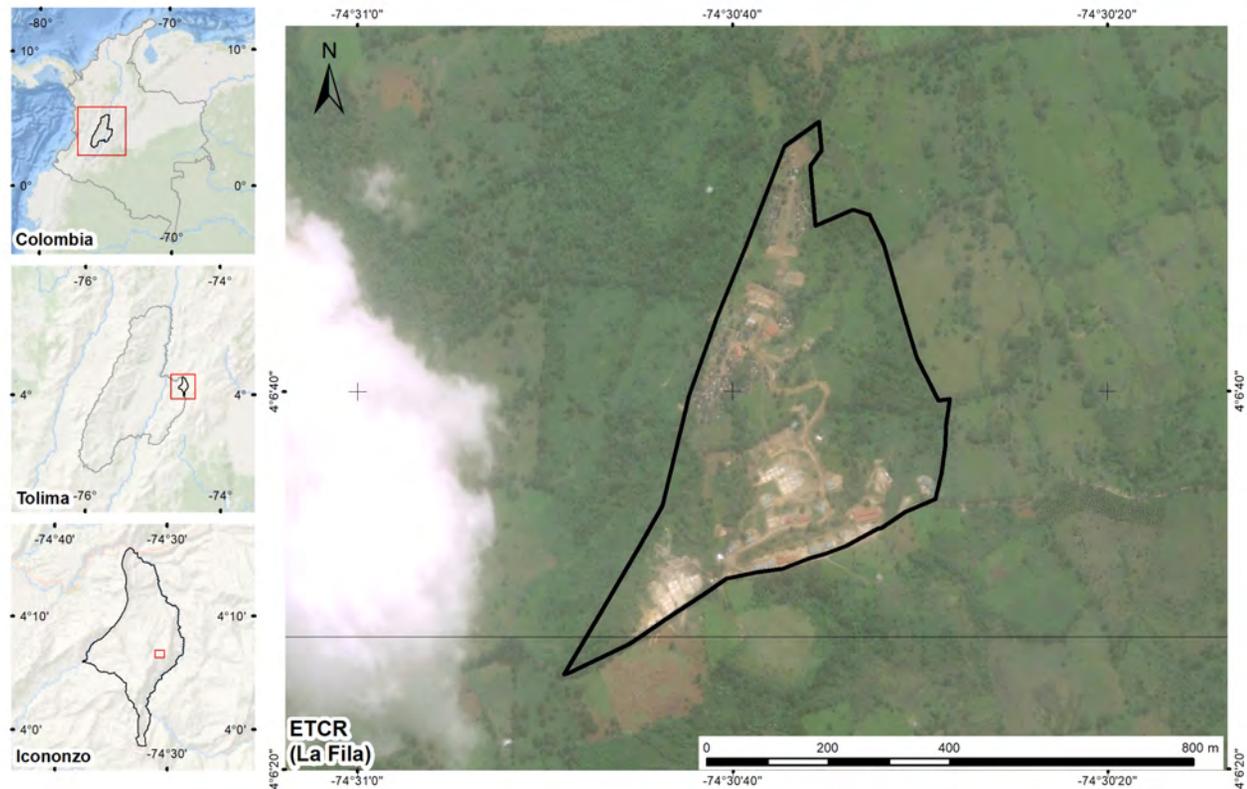


Figura 2: Localización del antiguo ETCR La Fila.

que se realiza allí es muy artesanal y su producción no es representativa a nivel nacional.

#### 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 el año 1997 se encuentran algunas construcciones dispersas a lo largo de las vías que cruzan la cuenca. A partir del año 2015 se observa un aumento en las construcciones en lo que ahora constituye el predio del ECTR, consolidándose aún más en el año 2020. Adicionalmente en este año aumentan las construcciones dispersas asociadas a las vías que cruzan la cuenca. Para este año se llega a un área urbana de cerca de  $13.000\ m^2$ . Lo que representa un crecimiento de cerca de 200 % con respecto al año 2015. En el sur de la cuenca algunas zonas con cobertura de nubes persistente son falsamente clasificadas como suelos urbanos, por lo que pueden aparecer sobrestimados.

En la Figura 3 se puede apreciar la evolución de la ocupación en la cuenca desde el año 1997 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 Landsat 7, 8 y 5 para los años 2020, 2015 y 1997, respectivamente. Algunas zonas se encuentran sin datos dada la alta persistencia de la cobertura de nubes en la cuenca.

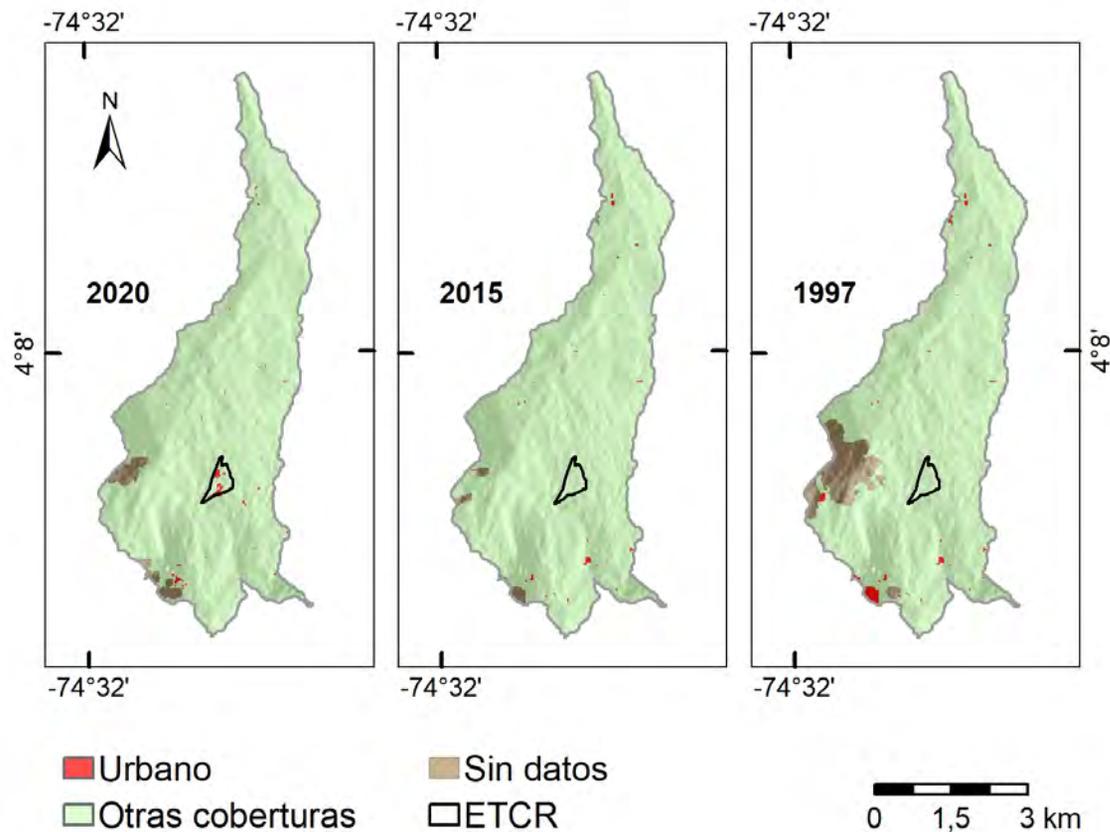


Figura 3: Evolución de la ocupación.

### 1.4.1. Contexto geológico y geomorfológico

El predio de La Fila está sobre la plancha geológica 265-Icononzo ubicada sobre la cordillera Oriental de Colombia. En el área afloran rocas sedimentarias del Grupo Guadalupe, formación Seca y Lodolitas de Fusagasugá, con edades que van desde el Paleozoico Superior hasta el cuaternario INGEOMINAS (2002). Estructuralmente la zona está dividida en tres bloques, el predio La Fila se encuentra sobre el bloque Central que se caracteriza por presentar amplios sinclinales limitados por fallas de cabalgamiento INGEOMINAS (2002) (Figura

4).

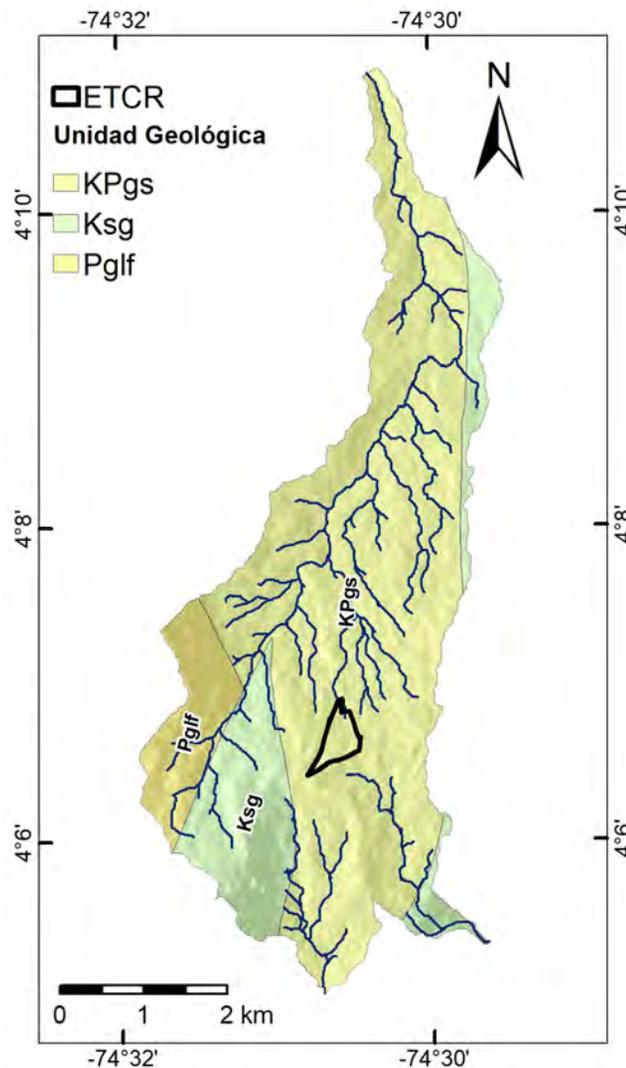


Figura 4: Mapa geológico 1:100.000 predio La Fila

El Grupo Guadalupe (Ksg) se presenta como un paquete monótono de capas delgadas a gruesas, plano paralelas y no paralelas ondulosa de cuarzoarenita con algunas intercalaciones de lodolitas y arcillolitas. La formación Seca (KPgs) se encuentra representada en general por arcillolitas rojas y abigarradas, con algunas intercalaciones de arenitas de cuarzo y arcillolitas en capas gruesas a medias, formando amplios y extensos valles que contrastan con los escarpes formados por sedimentos del cretácico. Y las lodolitas de Fusagasugá (Pglf) están constituidas por lodolitas con niveles de arenitas. Las lodolitas son claramente reconocibles por los valles suaves que generan que contrastan con los escarpes producidos por las arenitas; y las arenitas presentan estructuras como

la laminación inclinada, paralela ondulada y plano-paralela (INGEOMINAS, 2002).

Desde el punto de vista estructural se encuentra ubicada en un sector tectónicamente complejo que se caracteriza por la presencia de sinclinales asimétricos amplios y extensos, en contraste con anticlinales pequeños apretados. Los pliegues se encuentran limitados por fallas inversas orientadas en sentido NE-SW, con planos inclinados preferencialmente hacia el oriente (INGEOMINAS, 2002) (Figura 5).

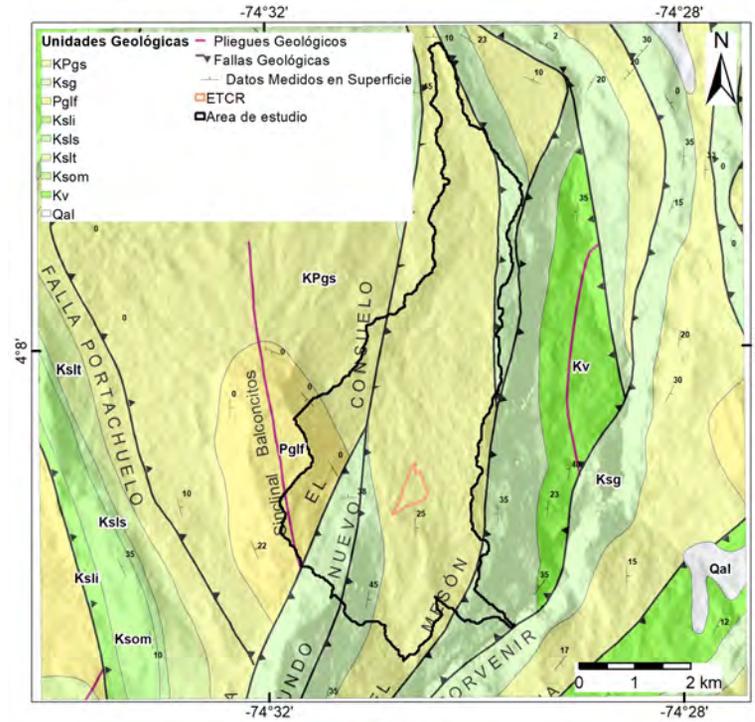


Figura 5: Mapa litoestructural predio La Fila

Geomorfológicamente el área se caracteriza por la presencia de pequeños montículos y ondulaciones de origen denudacional (Dmo) (Figura 7) , que contrastan con una extensa gama de geoformas de ambiente estructural (Figura 9). Como geoformas de origen estructural sobresalen sierras homoclinales y sinclinales (Sss) conformadas por una prominencia topográfica ligeramente simétrica elongada, definida por una secuencia de estratos apilados e inclinados o en el eje de un sinclinal ( $\geq 35^\circ$ ) en una misma dirección (Ssh) (Figura 6) . También se observan sierras y lomos de presión relacionados al truncamiento y desplazamiento vertical o lateral por procesos de fallamiento (Sslp) (Figura 9). Finalmente resaltan los escarpes de línea de falla como planos subverticales cortos a muy cortos, convexo de pendiente abrupta (Slfe). Se presenta como franjas

alargadas a cortas, con pendientes abruptas a escarpadas con rangos que oscilan entre los  $\geq 30^\circ$  y mayores a  $\geq 45^\circ$  (Figura 8) eventualmente verticales, de forma cóncavo o convexo, originado por erosión acentuada a lo largo de un escarpe de falla, donde se presentan procesos de caída rocas y suelos, flujos de detritos y deslizamientos traslacionales y eventualmente volcamientos, los cuales se pueden observar en las planicies aluviales de los drenajes que los limitan (INGEOMINAS, 2002).



Figura 6: Panorámica de prominencia topográfica ligeramente simétrica elongada



Figura 7: Panorámica de montículos y ondulaciones de origen denudacional (Dmo)



Figura 8: Panorámica de ladera de pendiente abrupta

## 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 Barabara (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 La Fila, 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 La Fila, las cuales son mostradas en La Tabla 1

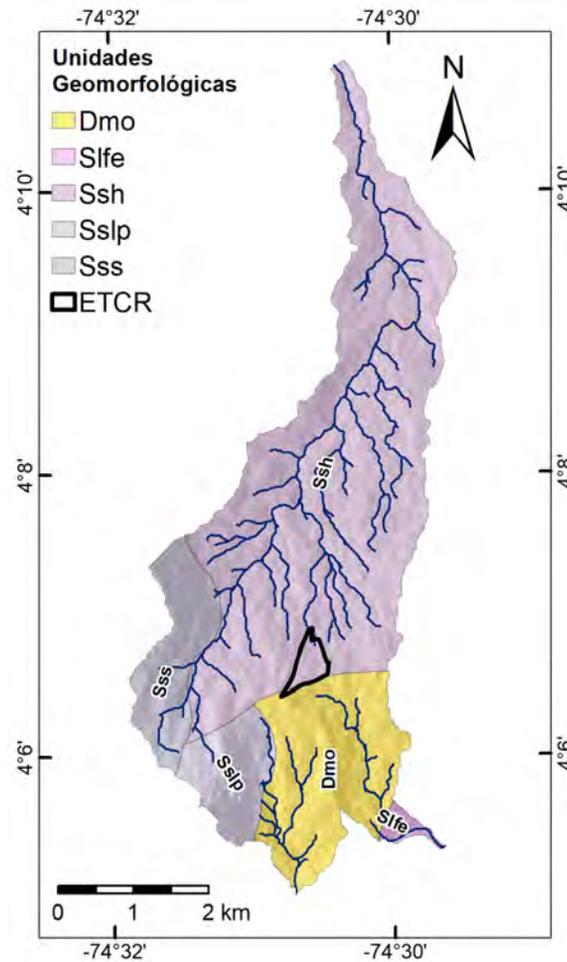


Figura 9: Mapa geomorfológico 1:100.000 predio La Fila

y su ubicación se visualiza en la Figura 10.

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.

Tabla 1: Estaciones pluviométricas del IDEAM cercanas al antiguo ETCR La Fila.

Estación	Código	Inicio del registro	Datos faltantes (%)
OSPINA PEREZ	21190240	1972-06-23	3,1
GRANJA LA HACIENDA	21190410	1983-01-01	9,7
PANDI	21195060	1969-06-20	4,7

**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 pre-

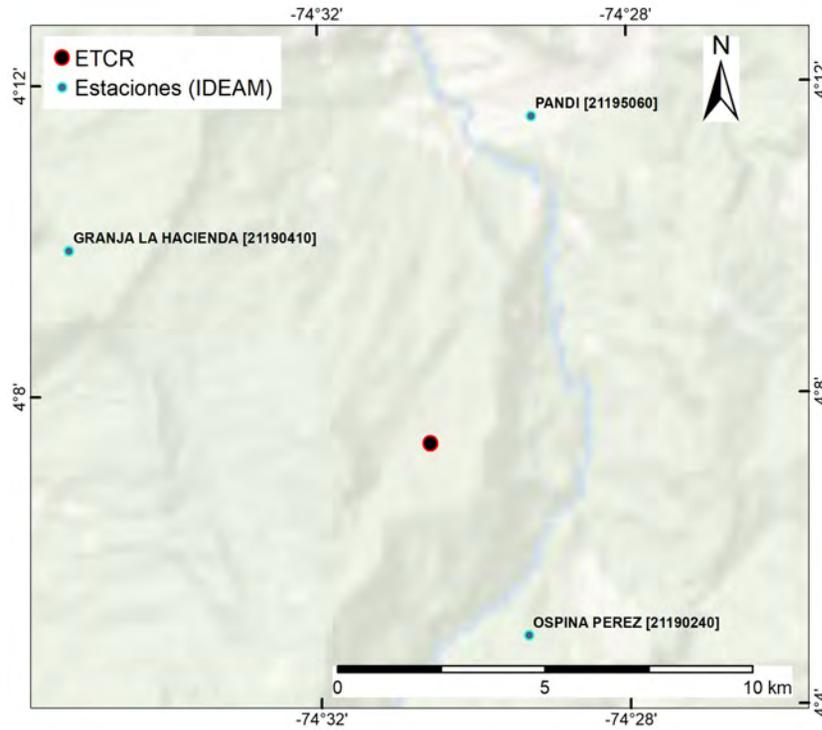


Figura 10: Estaciones IDEAM cercanas al antiguo ETCR La Fila

precipitaciones diarias multianuales, donde se busca los valores medios y máximos para cada uno de los días, los resultados se muestran en las Figuras 12, 11 y 13, 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).

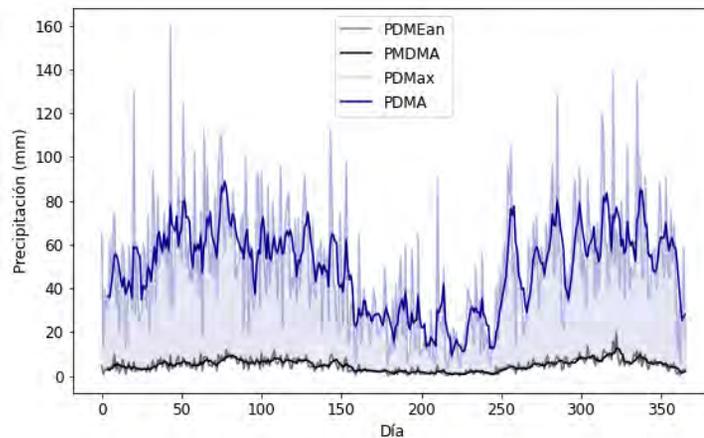


Figura 11: Precipitación diaria multianual estación Granja La Hacienda

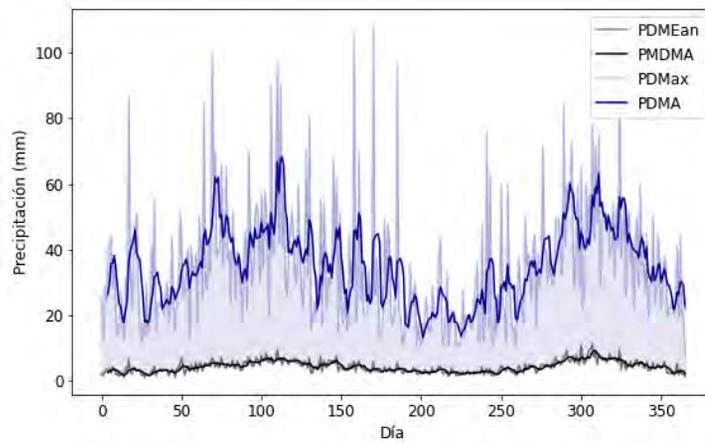


Figura 12: Precipitación diaria multianual estación Ospina Perez

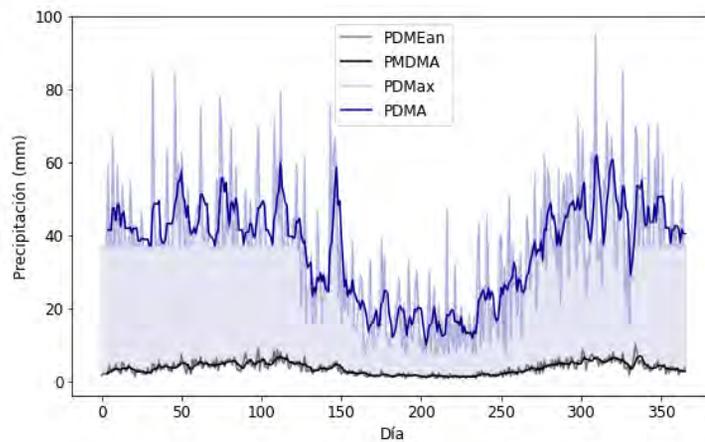


Figura 13: Precipitación diaria multianual estación Pandi

Dentro de los resultados obtenidos se observa que, la estación con los valores más altos en las precipitaciones máximas multianuales, es la estación Granja La Hacienda (Figura 11) donde se evidencia que los valores van desde los 10 a los 160 mm/día y en lo que respecta a la precipitación media diaria multianual, esta oscila al rededor de los 4,3 mm/día, por otro lado, la estación Ospina Perez (Figura 12) reporta que los valores máximos de precipitaciones diarias multianuales oscilan entre 10 a 100 mm/día y precipitación media diaria multianual, varía al rededor de los 4,8 mm/día.

Por último, en la estación Pandi (Figura 13), presenta precipitaciones máximas diarias multianuales que fluctúan entre los 10 a los 100 mm/día, y las precipitaciones diarias multianuales oscilan al rededor de los 3,6 mm/día. Esta última estación tiene la particularidad de que, a comparación con las demás evaluadas, a inicios y fin de año los valores máximos de precipitación diaria

multianual son más altos a comparación con lo registrado en las demás estaciones.

**Precipitación mensual multianual con estaciones IDEAM.** Los resultados obtenidos para cada una de las estaciones, se encuentran en las Figuras 14, 15 y 16.

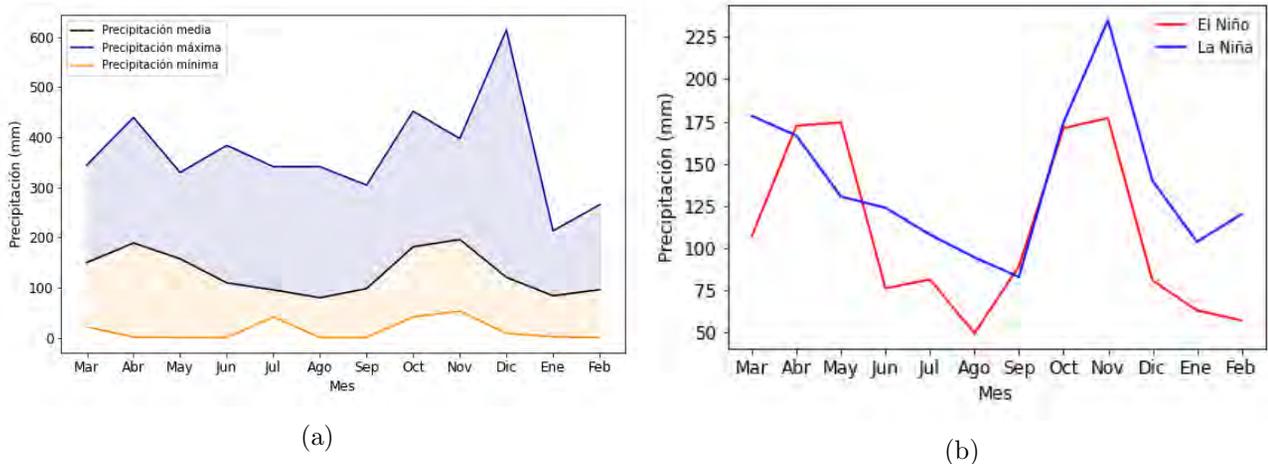


Figura 14: Precipitación mensual multianual para la estación Ospina Pérez, A)Valores medios, máximos y mínimos. B)Precipitación media mensual multianual para meses con ocurrencia del El Niño y La Niña

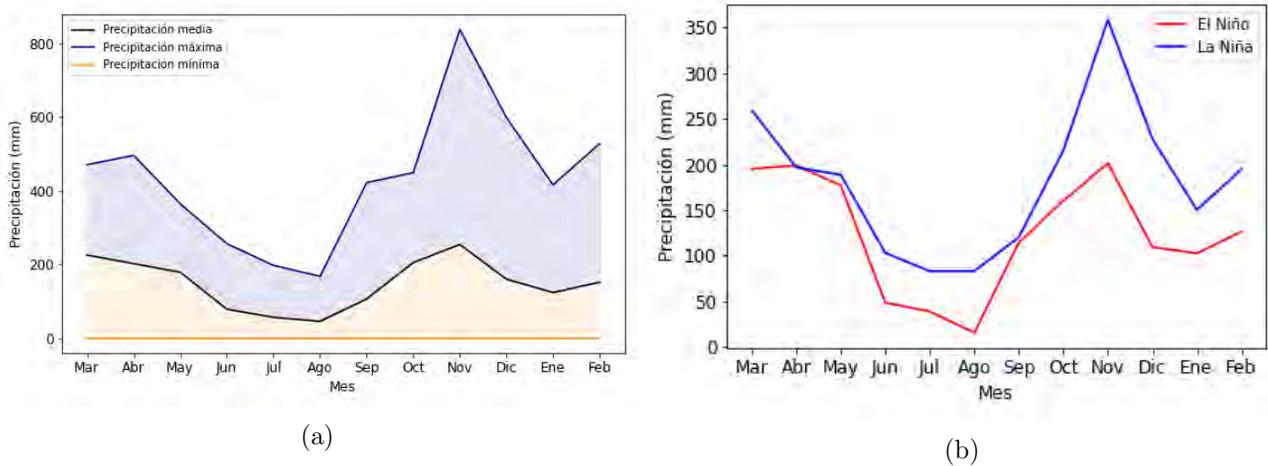


Figura 15: Precipitación mensual multianual para la estación Granja La Hacienda, A)Valores medios, máximos y mínimos. B)Precipitación media mensual multianual para meses con ocurrencia del El Niño y La Niña

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

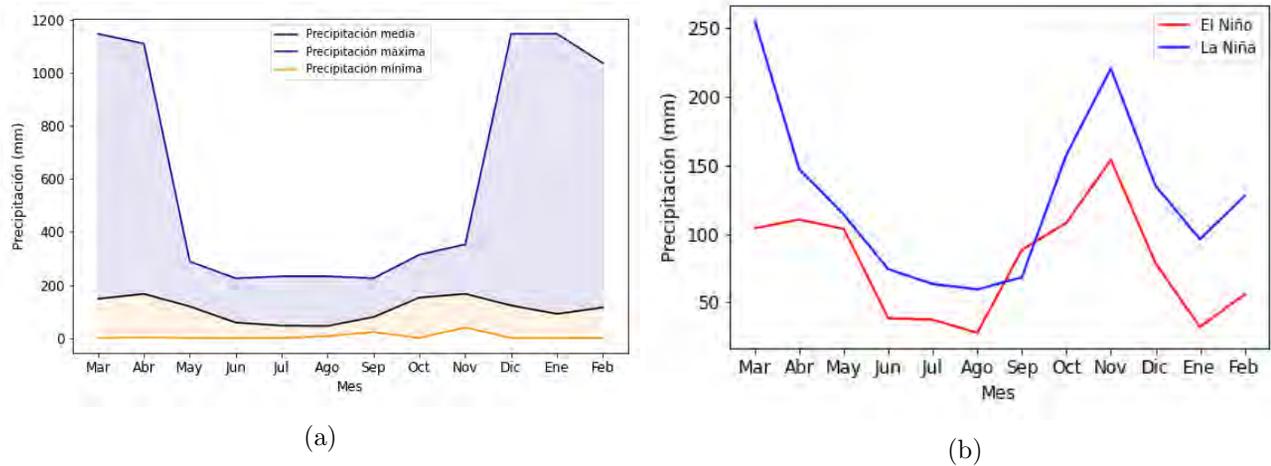


Figura 16: Precipitación mensual multianual para la estación Pandi, A)Valores medios, máximos y mínimos. B)Precipitación media mensual multianual para meses con ocurrencia del El Niño y La Niña

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 100mm/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 200mm/mes. Así mismo, se puede observar que para la estación que las precipitaciones máximas oscilan entre los 300 a 600 mm/mes para la estación Ospina Pérez, entre los 300 a 800 mm/mes para la estación Granja La Hacienda y entre los 300 a 1200 mm/mes para la estación Pandi, así se puede determinar que al rededor de la estación Pandi es donde se pueden presentar las mayores precipitaciones a escala mensual, a comparación con la ubicación de las demás estaciones. Por otro lado se tiene que, el promedio de la precipitación media mensual multianual puede variar al rededor de los 129,4, 148,5 y 109 mm/mes para las estaciones Ospina Pérez, Granja La Hacienda y Pandi, respectivamente. Además, se poseen los resultados de la precipitación mínima alcanzada en cada una de las estaciones, es importante resaltar que el registro más bajo se presenta en la estación Granja La Hacienda, donde se visualiza que en cada uno de los meses las precipitaciones lograron alcanzar los 0 mm/mes.

Analizando los resultados mostrados en las Figuras 14B, 15B y 16B sobre la precipitación media mensual multianual en periodos EL Niño y La Niña, se

tiene que, en todas las estaciones, los promedios de las precipitaciones mensuales durante La Niña, son más elevadas a comparación con los meses en los cuales se registra periodos El Niño, por tanto, cambios en las variables macro climáticas, pueden tener repercusiones sobre anomalías en la hidrología de la zona de estudio.

**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); 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 17, 18 y 19.

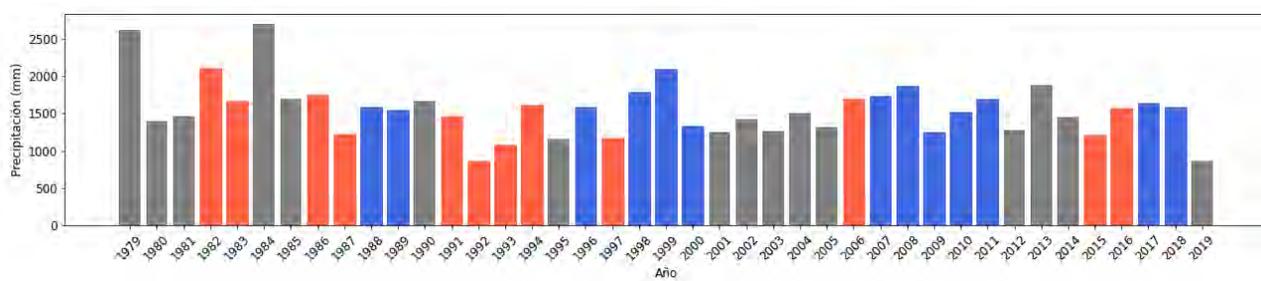


Figura 17: Precipitación anual multianual de la estación Ospina Perez, donde, las barras color rojo representan la ocurrencia de El Niño, el color azul La Niña y el gris periodos Neutros.

En lo 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 Ospina Pérez (Figura 17), la máxima precipitación alcanzada, a escala anual, es

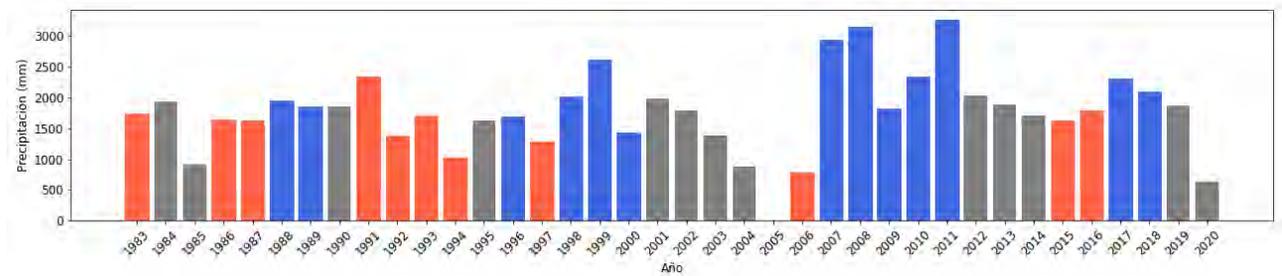


Figura 18: Precipitación anual multianual de la estación Granja La Hacienda, donde, las barras color rojo representan la ocurrencia de El Niño, el color azul La Niña y el gris periodos Neutros.

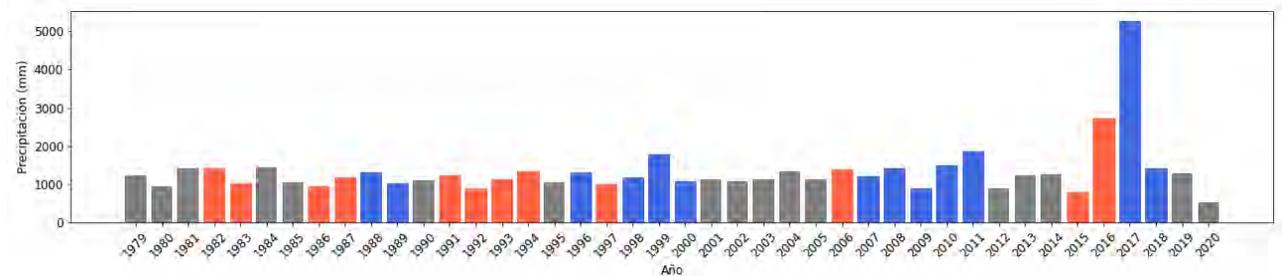


Figura 19: Precipitación anual multianual de la estación Pandi, donde, las barras color rojo representan la ocurrencia de El Niño, el color azul La Niña y el gris periodos Neutros.

de alrededor de los 2500 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 Neutro, por el contrario, se tiene que las precipitaciones mínimas anuales pueden llegar a ser al rededor de los 1000 mm/año y el promedio de las precipitaciones anuales son de 1490,7 mm/año. En lo que respecta a la estación Granja La Hacienda (Figura 18), las precipitaciones máximas a escala anual pueden llegar a ser superiores a los 3000 mm/año y este coincide con la ocurrencia de periodos La Niña, las precipitaciones mínimas anuales son al rededor de los 1000 mm/año y el promedio de las precipitaciones en el año puede ser del orden de 1704,2 mm/año. Es importante resaltar que, el año 2005 no se registraron las precipitaciones y por tal razón, en la Figura 18 no se presenta información en el año 2005. Por otro lado, en la estación Pandi (Figura 19), se resalta el evento de precipitaciones ocurrido en el 2017, donde se alcanzaron precipitaciones máximas de alrededor de los 5000 mm/año que, de las 3 estaciones evaluadas esta es la que ha registrado el mayor valor de precipitaciones anualmente, por otro lado, las precipitaciones mínimas son de 700 mm/año aproximadamente y las precipitación media anual es de 1140,9 mm/año; es importante mencionar

que los valores máximos y mínimos de precipitación ocurrieron en periodos La Niña y El Niño, respectivamente.

### 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.

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 20 hacen referencia al análisis de las precipitaciones diarias multianuales sobre la cuenca de la quebrada La Laja, con valores medios y máximos para cada uno de los días del año. Se puede evidenciar que según los datos registrados por CHIRPS se observan precipitaciones máximas (línea color azul opaco) por encima de los 100 mm/día y la precipitación media (línea negra opaca) puede oscilar alrededor de los 10 mm al día.

**Precipitación mensual multianual CHIRPS.** La Figura 21 señala que las precipitaciones sobre el territorio son bimodales, con dos periodos de precipitaciones medias altas en Marzo, abril y mayo con lluvias de aproximadamente 180mm/mes en el mes de mayo y un segundo pico en los meses de septiembre,

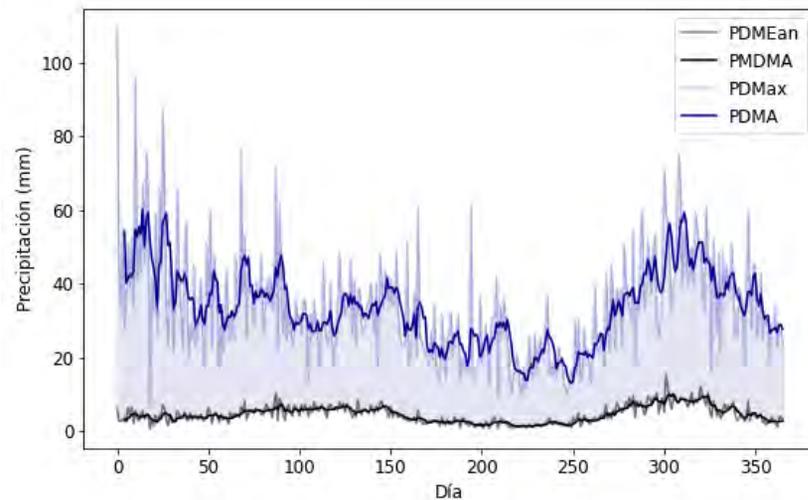


Figura 20: Precipitación diaria multianual estimación CHIRPS a nivel de cuenca

octubre y noviembre donde se superan los 230mm/mes, también hay unos periodos de valores bajos en la precipitación, que oscilan entre los 100 y 120 mm/mes aproximadamente. En lo que respecta a los eventos extremos, las máximas precipitaciones alcanzadas a escala mensual llegaron a ser del orden de 400 mm/mes y las precipitaciones mínimas llegan a alcanzar los 0 mm/mes. Igualmente se analiza de los meses de ocurrencia de El Niño y La Niña donde se puede visualizar que en la ocurrencia de eventos La Niña, existe un leve aumento de las precipitaciones mensuales, especialmente en los meses de Septiembre, Octubre y Noviembre.

**Precipitación Anual CHIRPS.** La Figura 22 señala los valores de lluvia anual, registrados por CHIRPS, oscilan entre 500 a 3000mm/año en la cuenca que se encuentra el antiguo ETCR. Es importante aclarar, que los valores sobredimensionados en la precipitación brindada por CHIRPS, es debido a que la metodología utilizada, como se menciona anteriormente, agrega la información distribuida a un solo valor, por tanto, entre más grande sea el área de estudio, los valores de precipitación tienen a aumentar, a pesar de esto, se puede evidenciar que la información brindada por el IDEAM y CHIRPS siguen la misma tendencia, es decir tiende a coincidir los momentos en las cuales existe un alza o déficit de las precipitaciones.

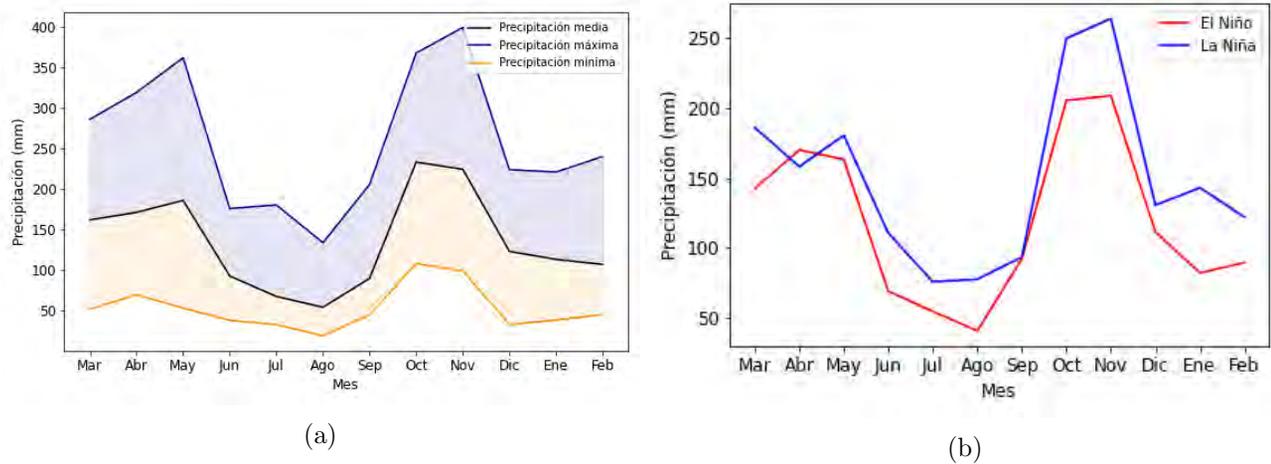


Figura 21: Precipitación mensual multianual CHIRPS a nivel de cuenca, A) Valores medios, máximos y mínimos. B) Precipitación media mensual multianual para meses con ocurrencia del El Niño y La Niña

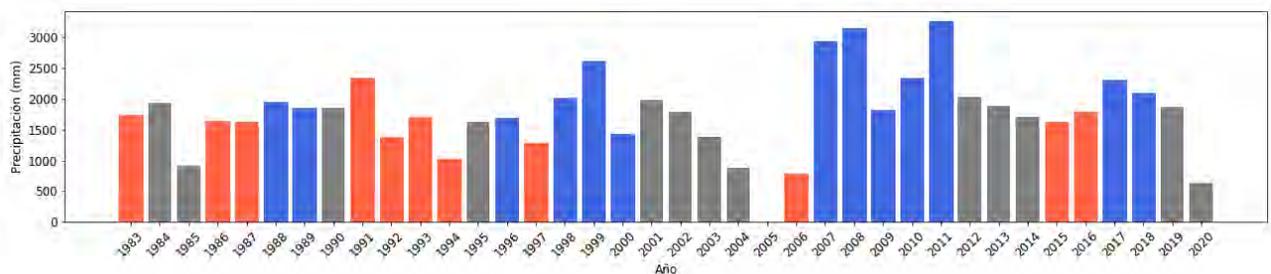


Figura 22: Precipitación anual multianual CHIRPS sobre la cuenca D, donde, las barras color rojo representan la ocurrencia de El Niño, el color azul La Niña y el gris periodos Neutros.

### 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, en la ubicación exacta donde se encuentra el pluviómetro del IDEAM y se compara con los datos registrados en la estaciones Ospina Perez, Granja La Hacienda y Pandi, agregando los datos a escala diaria, mensual y anual.

Los resultados a escala diaria son mostrados en la Figura 23, 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 0,16, 0,17 y 0,12 para las estaciones Ospina Pérez, Granja La Hacienda y Pandi, respectivamente, lo cual respalda lo evidenciado en la Figura 23.

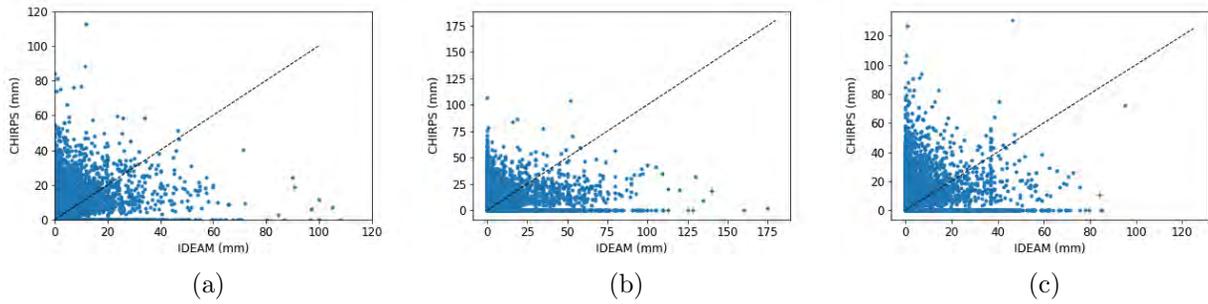


Figura 23: Correlación a escala diaria de la información dada por los pluviómetros del IDEAM y CHIRPS en las estaciones A)Ospina Pérez, B) Granja La Hacienda y C) Pandi.

En lo que respecta a los resultados de la correlación a escala mensual, como se puede observar en las Figura 24, se evidencia que en las estaciones, existe relación entre los resultados brindados por el IDEAM y CHIRPS; con lo referente al coeficiente de correlación de Pearson, se obtuvieron los siguientes valores 0,7, 0,68 y 0,42 para las estaciones Ospina Pérez, Granja La Hacienda y Pandi, respectivamente, con base en estos resultados se puede determinar que la correlación más baja entre las variables dadas por las dos fuentes de información, se presenta en la estación Pandi.

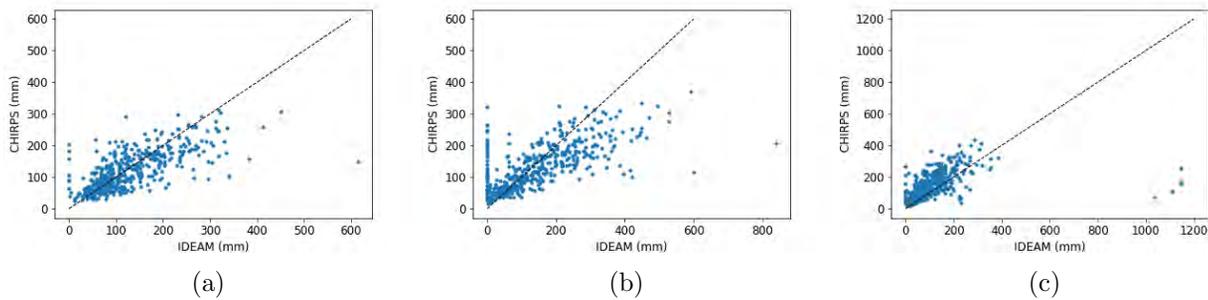


Figura 24: Correlación a escala mensual de la información dada por los pluviómetros del IDEAM y CHIRPS en las estaciones A)Ospina Pérez, B) Granja La Hacienda y C) Pandi.

La comparación de la información brindada por CHIRPS y el IDEAM a escala anual, se evidencia en las Figuras 25, donde, la correspondencia entre los datos no es tan evidente en las estaciones Granja La Hacienda y Pandi, para determinar como es su relación, se buscan los resultados del coeficiente de correlación de Pearson, los cuales son 0,66, 0,53 y 0,27 para las estaciones Ospina Pérez, Granja La Hacienda y Pandi, respectivamente, de aquí se puede determinar que la estación que guarda mayor correlación entre los datos de precipitación de CHIRPS e IDEAM es la estación Ospina Pérez.

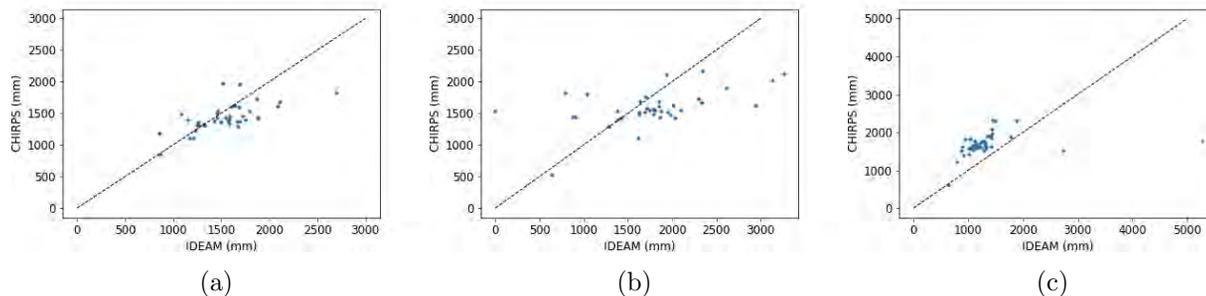


Figura 25: Correlación a escala anual de la información dada por los pluviómetros del IDEAM y CHIRPS en las estaciones A)Ospina Pérez, B) Granja La Hacienda y C) Pandi.

### 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.

**Precipitación diaria multianual CHIRPS.** La precipitación diaria distribuida se encuentra en la Figura 26, donde, se puede observar que en promedio, la zona norte del área de estudio es donde se presentan las máximas precipitaciones y los valores medios diarios pueden oscilar entre los 4 a 4,7 mm/día. Por otro lado las precipitaciones máximas a escala diaria (Figura 26B) han ocurrido en la zona central de la cuenca de la quebrada La laja alcanzando los 150,3 mm/día.

**Precipitación mensual multianual CHIRPS.** En lo que respecta a la distribución espacial de las precipitaciones a escala mensual, se tienen los resultados mostrados en la Figura 27, donde, al igual que a escala diaria, la máxima precipitación media mensual (Figura 27 a), ocurren al norte del área de estudio y los valores en los cuales varía es entre los 120,6 a los 143,2 mm/mes, así mismo se puede evidenciar en el mapa de precipitaciones máximas (Figura 27 b), que la zona donde ha caído más agua, a escala mensual, es en la parte norte del area de estudio, por el contrario, se tiene lo mostrado en la Figura 27 c donde se visualiza la distribución espacial de las precipitaciones mínimas, y se puede

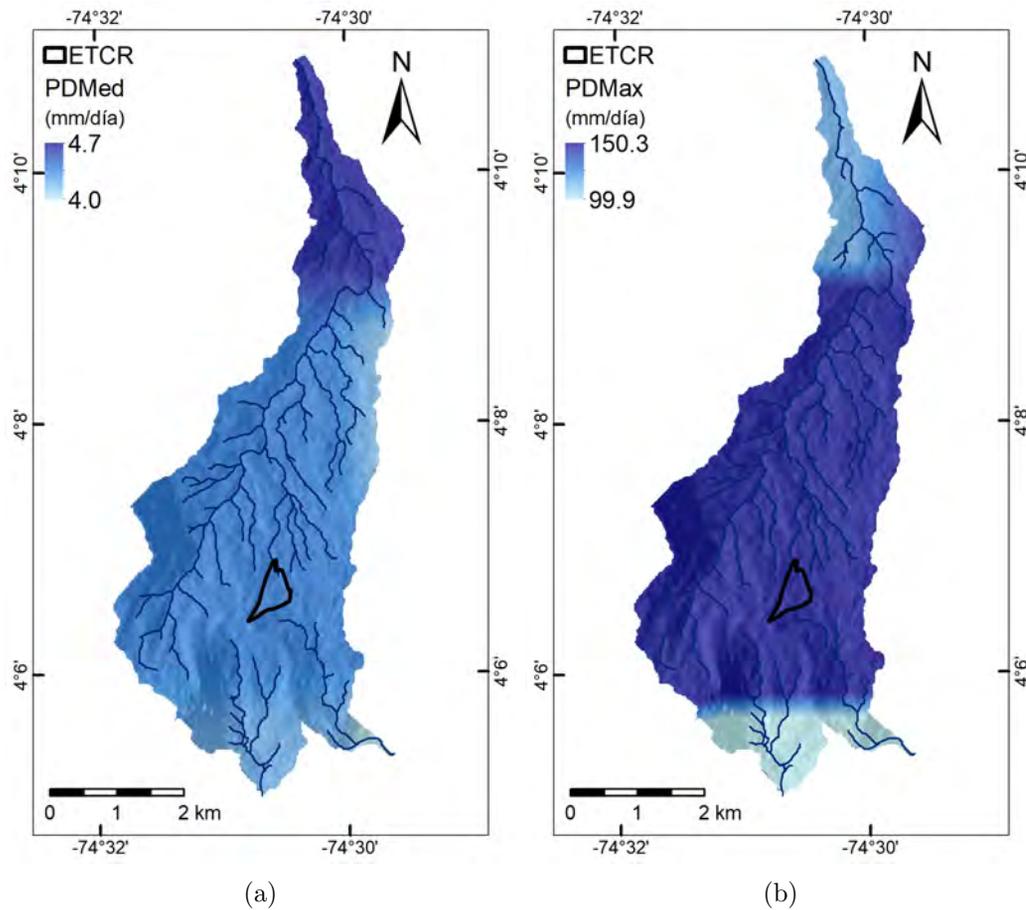


Figura 26: Variación espacial de la A) Precipitación diaria media (PDMed) y B) Precipitación diaria máxima (PDMax)

determinar que en la zona norte del área de estudio, es donde se ha logrado presentar las precipitaciones más bajas, alrededor de los 15,1 mm/mes.

Es importante mencionar que, la estación Pandi fue, entre todas las estaciones evaluadas, la que presentó los valores más altos de precipitación mensual Figura 16 a) y esta se encuentra ubicada en la zona norte de área de estudio (Figura 10), por tanto logra coincidir, en parte, el IDEAM y CHIRPS, al determinar las zonas donde más precipitaciones caen en y al rededor del sitio de interés.

## 1.6. Información secundaria

### 1.6.1. Estudios previos

Teniendo en cuenta el área de estudio y alcance del proyecto, se realizó un análisis y recolección de información secundaria, basado en la disponibilidad de estudios previos para todo el municipio de Icononzo, y de esta forma obtener

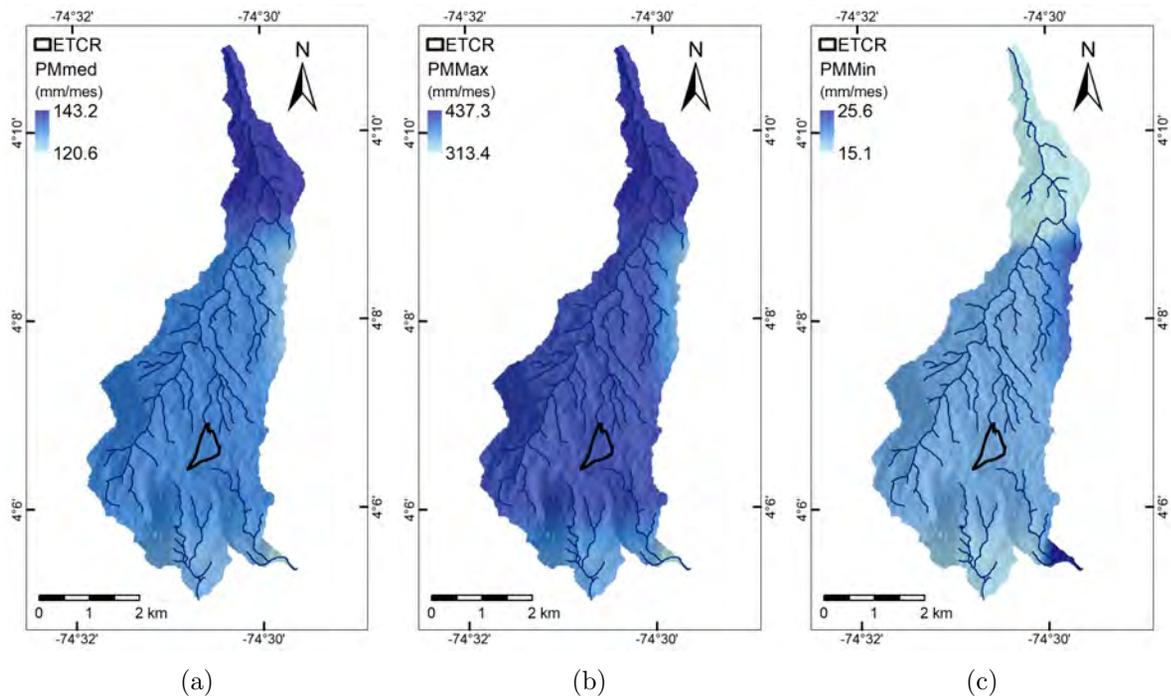


Figura 27: Variación espacial de la A) Precipitación mensual media (PDMed), B) Precipitación mensual máxima (PDMax) y C) Precipitación mensual mínima (PDMin)

una base sólida que permita entender la dinámica del territorio y la influencia que tienen las diferentes observaciones consolidadas anteriormente sobre toda la Entidad Territorial. A continuación se presentan los diferentes documentos identificados:

- **Esquema de ordenamiento territorial Municipal, Icononzo, (Municipio de Icononzo, 2007).** En el Documento se expresan la caracterización de zonas cercanas o que corresponden a análisis importantes para el entendimiento del territorio cerca o en el municipio de Icononzo. Inicialmente se destacan como zonas de amenaza alta y media por remoción en masa sectores aledaños al río Sumapaz por procesos tipo desprendimientos, desplomes y erosión aluvial.
- **Memoria Explicativa Plancha 265-Icononzo Zonificación y susceptibilidad a Movimientos en masa, Elaborado por SGC (2015).** Este estudio incluye la evaluación y zonificación de la amenaza a escala 1:100.000. Para esto se levanta diferentes variables condicionantes a nivel de cuenta, entre ellas el mapa geomorfológico.
- **Memoria explicativa de la Zonificación de la Susceptibilidad y**

**la Amenaza Relativa por Movimientos en Masa escala 1:100.000 plancha 265 – Icononzo.** (SGC y UPTC, 2014) En esta memoria explicativa de la plancha 265 (Icononzo), se incluyen los aspectos metodológicos utilizados para la evaluación de la susceptibilidad por geología, geomorfología, suelos y cobertura de la tierra. Ubicada sobre los departamentos de Cundinamarca, Tolima y Meta, la plancha 265 contiene grandes rasgos fisiográficos como las estribaciones de la Cordillera Central y el Páramo de Sumapaz, adicionalmente y debido a la alta actividad tectónica y estructural en el área así como los procesos de meteorización y erosivos que desarrollan los fenómenos de movimientos en masa, se hizo importante la continuación del estudio de Zonificación de la Susceptibilidad y la Amenaza Relativa por Movimientos en Masa en escala 1:100.000 en esta área, siguiendo los estudios del Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa en Escala 1:500.000 (INGEOMINAS). Utilizando el metodológico heurístico propuesto por el SGC e implementando variables cualitativas como la geología, geomorfología, suelos y cobertura y variables cuantitativas a partir de modelos digitales de elevación con el fin de generar un mapa de susceptibilidad, mediante un proceso analítico. En la evaluación de las distintas categorías cualitativas, el documento arroja unas zonas que sostienen una susceptibilidad muy baja, baja, media y alta, por ejemplo, la geología arrojó las zonas de alta susceptibilidad correspondiente con una amplia zona que se extiende desde la parte central hasta la zona occidental del área de estudio, correlacionando este grado a litologías ligadas a rocas sedimentarias. Siguiendo con actividades de campo y oficina, el resto de variables cualitativas fueron evaluadas y puestas en las distintas categorías de susceptibilidad, finalmente se obtienen mapas de zonificación de la susceptibilidad que permiten la toma de decisiones para una mejor planificación del territorio y la reducción de desastres.

### 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 forma to geotiff y con datum EGM96 (*Earth Gravitational Models*), el cual utilizado por el geode 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 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 28 correspondiente al 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 cua-

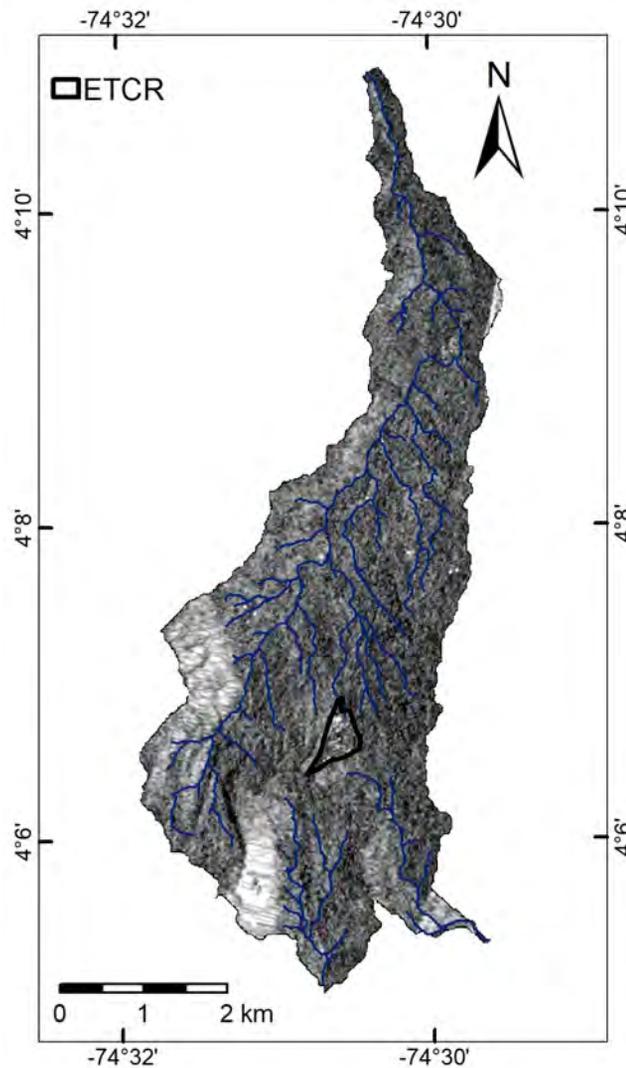


Figura 28: Imagen satelital representativa de la misión Sentinel 1 del año 2020.

tro 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 represen-

tativa en la Figura 29 correspondiente al año 2020.

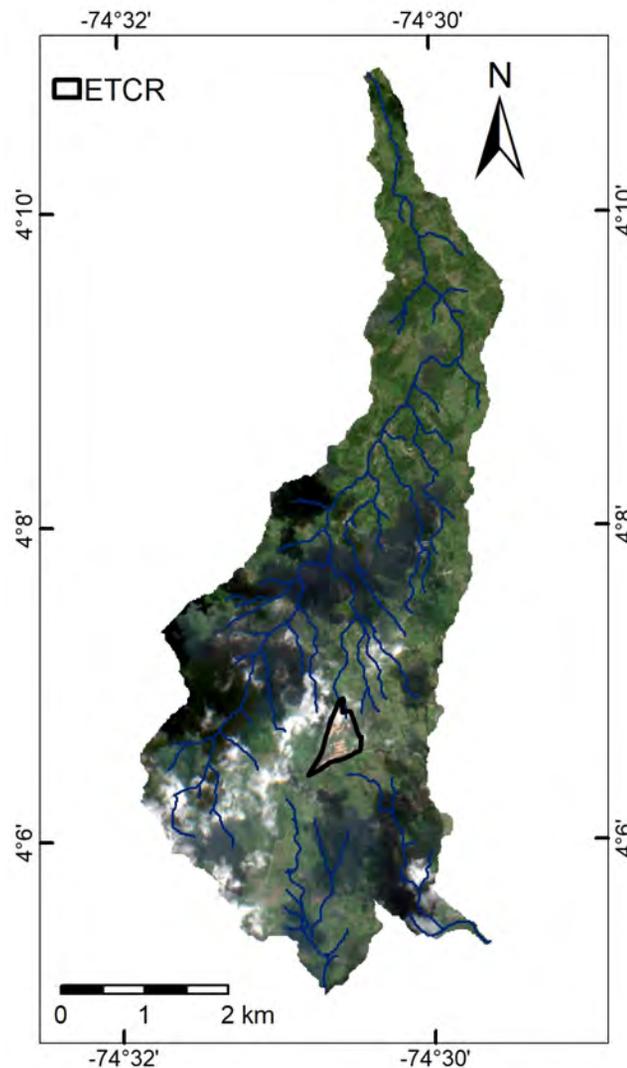


Figura 29: Imagen satelital representativa de la misión Sentinel 2 del año 2020.

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 30 corresponde a una imagen del año 2015 que cubre el antiguo ETCR La Fila.

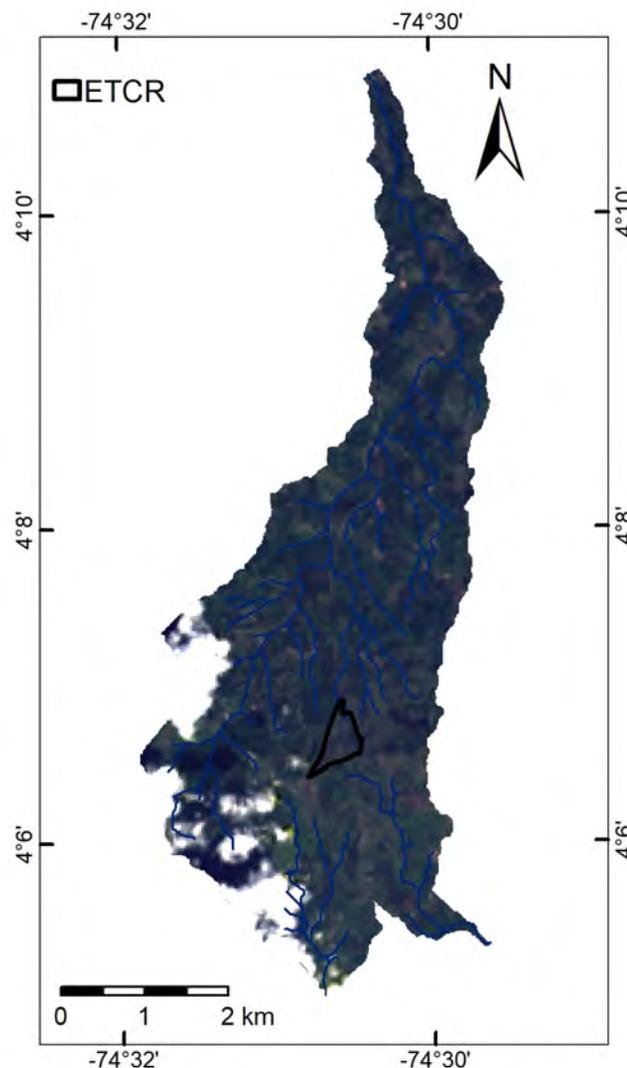


Figura 30: Imagen satelital representativa de la misión Landsat 8 del año 2015.

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 bandeamiento sobre sus productos (GoogleEarthEngine, 2020a; NASA, 2020). Del satélite Landsat5 se cuenta con registro del antiguo ETCR La Fila 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 31 presenta una de las imágenes más antiguas del

programa Landsat4 que se obtuvo de la zona de estudio, año 1996.

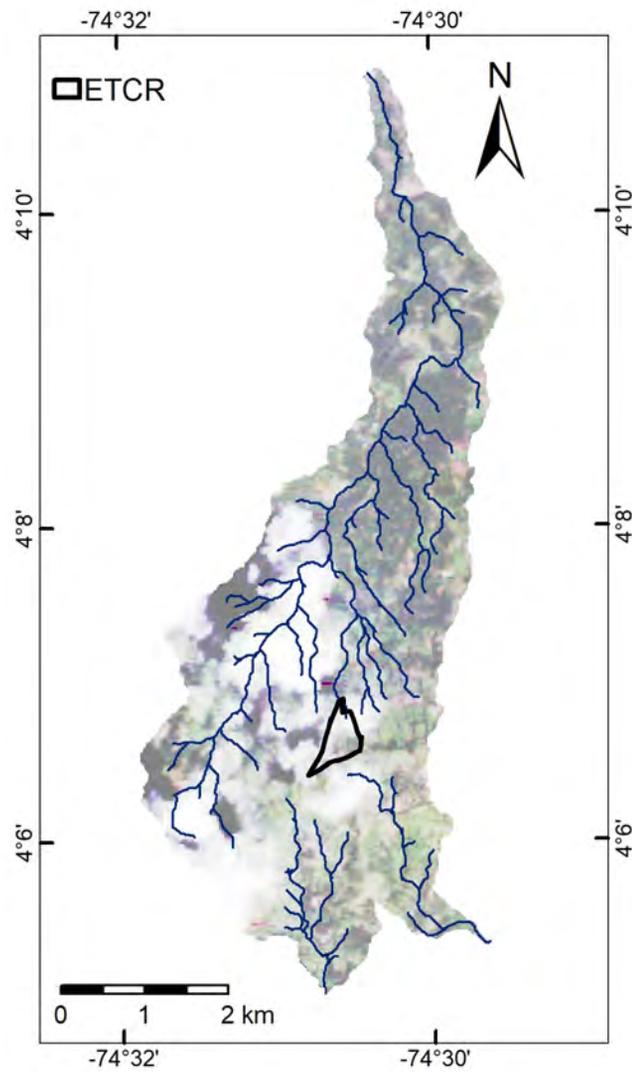


Figura 31: Imagen satelital representativa de la misión Landsat 4 del año 1987.

# Referencias

- 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. (2002). Compilación Geológica y Fotogeología de la plancha 265 Icononzo. Escala 1:100.000. , 1–84.
- Municipio de Icononzo. (2007). Esquema de Ordenamiento Territorial. , 2007(Enero 29), 39.
- 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. (2015). Sistema de información de movimientos en masa. *Servicio Geológico Colombiano*, 35. Descargado de <http://simma.sgc.gov.co/>
- SGC y UPTC. (2014). *Memoria explicativa de la Zonificación de la Susceptibilidad y la Amenaza Relativa por Movimientos en Masa escala 1:100.000 plancha 265 – Icononzo*. (Vol. 53; Inf. Téc. n.º 9). Sogamoso: SGC. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004

**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 Icononzo, 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 Esquema 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 y 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 párrafo 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 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 antiguos 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”.

En síntesis, este fue el origen de los Espacios Territoriales de Capacitación y Reincorporación - ETCR cuya vigencia de acuerdo con las normas revisadas, expiró el 15 de agosto de 2019. Sin embargo, dada su importancia al constituirse en los territorios donde se podrá concretar y materializar la paz, hay que propender por su permanencia en el tiempo no bajo esta misma denominación sino a través de la creación de una ruta jurídica que permita su desarrollo y ocupación en el territorio garantizando su integración con las comunidades aledañas y donde se posibilite el derecho a vivir dignamente y en ejercicio pleno de sus derechos de ciudadanía, de modo que como colectivo formalizado dentro del ordenamiento jurídico sean partícipes de la toma de decisiones por parte del Estado, en la definición de políticas públicas.



Figura 32: Proceso de creación de los antiguos ETCR.

## 2.2. Viabilización del antiguo ETCR La Fila a la luz de la norma de ordenamiento territorial vigente

En el siguiente apartado se desarrollará el tema de la vigencia a partir del análisis de las normas que regulan la materia contrastadas con los actos administrativos por los cuales se adoptó el EOT del municipio, esto con el fin de

establecer si se encuentra vigente o no, para una vez establecida esta condición, presentar las alternativas de incorporación del antiguo ETCR al Esquema de Ordenamiento Territorial, señalando 3 rutas o caminos para su implementación, acompañadas cada una de ellas de los aspectos más relevantes que tendrán incidencia al momento de su incorporación. Así mismo 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. Vigencias POT**

La revisión y ajuste de los POT está contemplada en el artículo 28 de la Ley 388 de 1997, modificado por el artículo segundo de la Ley 902 de 2004, reglamentado por el Decreto Único 1077 de 2015, modificado a su vez por el artículo 120 del Decreto Ley 2106 de 2019:

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 esta normatividad fue compilada por el Decreto 1077 de 2015<sup>1</sup> en la subsección 3, artículo 2.2.2.1.2.3.3 el cual establece 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 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 respectivos contenidos.

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 la vigencia del Plan de Ordenamiento

---

<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.

Territorial (POT) 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.

Especificando en el párrafo de éste artículo que el término de vigencia corresponde al cumplimiento de la vigencia de largo plazo del plan de ordenamiento territorial, durante tres períodos constitucionales completos.

Adicionalmente en el Artículo 2.2.2.1.2.2.3 al referirse a las condiciones para adelantar la concertación con la Corporación Autónoma Regional o autoridad ambiental competente, señaló en el párrafo transitorio que los proyectos del Plan de Ordenamiento Territorial o su revisión o modificación que se radiquen completos y en debida forma ante la autoridad ambiental competente hasta el 31 de marzo de 2021, podrán presentarse cumpliendo con los contenidos establecidos en las normas vigentes antes de la modificación establecida por la presente norma. Así las cosas, los municipios que están en este momento en proceso de revisión y/o modificación tienen plazo hasta la citada fecha para presentar sus POT con las normas anteriores a la expedición de este decreto, de lo contrario tendrán que armonizar sus normas a los nuevos parámetros o directrices señaladas por el Decreto 1077 de 2015.

continuación se presentan los actos administrativos mediante el cual se adoptó el EOT del municipio de Icononzo 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 003 de Enero 29 de 2007 Primer EOT. Establece vigencia de 14 años o 3 períodos constitucionales completos**
- Acuerdo 004 de Marzo 02 de 2014 (Modificación Excepcional)
- Acuerdo 006 de 2016 (modificación excepcional de norma urbanística-procedimiento especial PND)

### **Vigencia**

- Expirada en su contenido de largo plazo el 31/12/2019

## **2.2.2. Procedimiento de revisión y ajuste de los POT**

Luego de la evaluación de la vigencia del EOT del municipio de Icononzo, se concluye que sus contenidos de corto, mediano y largo plazo han expirado, aun-

que 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 003 de 2007, pero en el evento de ajustarse el articulado del POT deberá necesariamente adelantarse sus modificaciones a través de **la revisión ordinaria del POT** de largo plazo al considerarse el único proceso que habilita la modificación de Objetivos y Estrategias de Largo Plazo y el establecimiento de vigencia de Contenidos en consonancia con lo establecido en el artículo 28 de la ley 388 de 1997 y el artículo 6, Numeral 9 de la ley 1551 de 2012. Por su parte **la modificación excepcional de norma urbanística** se considera sólo aplicable en aquellos municipios donde 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 en pro del cumplimiento de los objetivos y estrategias de largo y mediano plazo. Por todo lo anterior y ante la ausencia de norma aplicable para el caso en concreto se recomienda su utilización durante la vigencia de los contenidos de largo plazo (3 períodos constitucionales); y una tercera opción es la **creación de un trámite extraordinario de aprobación de normas urbanísticas**, todo ello con miras a que el antiguo ETCR sea debidamente incorporado 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.

### 2.2.2.1. Revisión Ordinaria del POT

La revisión y ajuste de los POT está contemplada en las Leyes 388 de 1997 y 1551 de 2012 reglamentadas en el Decreto 1077 de 2015 modificado por el 1232 de 2020. 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.

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 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 POT los cuales se consideran fijos de 12 años o 3 períodos completos constitucionales de los alcaldes.

En la figura 33<sup>2</sup>, se presenta un posible cronograma de ejecución del proyecto habitacional en un escenario de revisión ordinaria del EOT como punto de partida y culminando con la entrega de viviendas de interés social rural.

---

<sup>2</sup>El tiempo máximo de aprobación del EOT en el Consejo Municipal es de máximo 90 días calendario, pero podría tramitarse en menos tiempo según lo determine el Reglamento Interno del Concejo después de surtir un debate en comisión y un debate en plenaria. En caso de no aprobación por parte del Concejo podrá ser adoptado por Decreto del Alcalde superados los 90 días de sesión sin haberse tomado decisión de aprobación o desaprobación.



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

- Su incorporación en debida forma al EOT haría que el antiguo ETCR quede armonizado normativamente con el resto del territorio municipal, surtiendo debidamente todas las etapas de divulgación, participación y concertación con los actores institucionales y la comunidad en general.
- Por lo que implica una revisión ordinaria del EOT se debe disponer de un tiempo estimado como mínimo de 18 meses, por lo cual se hace necesario ante la necesidad de implementar en el menor tiempo posible la norma urbanística para la debida ejecución del proyecto habitacional del antiguo ETCR de una apuesta decidida entre las autoridades locales en alianza con el Gobierno Nacional para sacar adelante esta iniciativa.
- El Decreto 1077 de 2015 en su artículo 2.2.2.1.2.3.3 establece los contenidos y la forma como se debe abordar la revisión del EOT, por lo tanto, esta norma permite adoptar unos nuevos planes de ordenamiento territorial con una visión más integral apostándole a la sostenibilidad social, económica y ambiental de los territorios municipales
- Se debe tener presente que 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 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 EOT.

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

Este procedimiento de modificación excepcional de normas urbanísticas de los Planes de Ordenamiento Territorial en los apartes que correspondan deberán acoger lo dispuesto en la Ley 388 de 1997 y sus Decretos reglamentarios 879 de 1998, 4002 de 2004, 1077 de 2015 y 1232 de 2020. Esta modificación podrá emprenderse en cualquier momento a iniciativa del Alcalde municipal, demostrando con estudios técnicos los motivos que llevan a dicha modificación.

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.

En la figura 34<sup>3</sup>, se presenta un posible cronograma de ejecución del proyecto habitacional en un escenario de modificación excepcional de norma urbanística del EOT como punto de partida y culminando con la entrega de viviendas de interés social rural.

---

<sup>3</sup>El tiempo máximo de aprobación del EOT en el Consejo Municipal es de máximo 90 días calendario, pero podría tramitarse en menos tiempo según lo determine el Reglamento Interno del Concejo después de surtir un debate en comisión y un debate en plenaria. En caso de no aprobación por parte del Concejo podrá ser adoptado por Decreto del Alcalde superados los 90 días de sesión sin haberse tomado decisión de aprobación o desaprobación.

**Tabla 2: Ruta con Modificación Excepcional de Norma Urbanística (Etapas de aprobación)**

#	ACTIVIDAD	ETAPA PBOT												LICENCIAS Y PERMISOS AMBIENTALES												URBANIZACIÓN Y CONSTRUCCIÓN												ENTREGA		
		MESES												MESES												MESES												MESES		
1	Apropiación presupuestal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
2	Contratación Equipo PBOT*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
3	Documento de Seguimiento y Evaluación PBOT Vigente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
4	Diagnóstico Territorial**	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
5	Formulación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
6	Proyecto de Acuerdo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
7	Memoria Justificativa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
8	Presentación Consejo de Gobierno	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
9	Concertación Ambiental	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
10	Concepto CTP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
11	Participación Democrática	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
13	Debate y aprobación Consejo Municipal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
14	Estudios Detallados de Amenazas y Riesgos***	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
15	Elaboración estudios de suelos****	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
16	Solicitud Trámite disponibilidad de ssp básicos (Acueducto y alcantarillado) o Permiso ambiental de merced de agua y disposición de aguas residuales****	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
17	Diseños urbanísticos****	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
18	Elaboración diseños arquitectónicos****	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
19	Elaboración Diseños Estructurales****	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
20	Diseños redes hidrosanitarias y eléctricas**	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
21	Trámite licencia urbanística (Parcelación, construcción, subdivisión, sellos de PH)****	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
23	Permisos ambientales de aprovechamiento de recursos naturales****	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
24	Postulación y adjudicación subsidios de vivienda****	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
25	Etapas de construcción de obra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
26	Constitución RPH o Escritura de subdivisión o loteo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
27	Autorizaciones de conexión a redes de SSPP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
28	Certificado de Ocupación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
29	Conexión a redes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
30	Escrituras públicas de adjudicación de vivienda	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												
31	Desembolso a constructor de subsidio de vivienda	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27												

Notas:

\*La duración de las actividades precontractuales dependerá de la existencia de disponibilidad presupuestal y existencia de equipo formulador preseleccionado.

\*\* La duración del diagnóstico territorial dependerá de la experiencia del equipo formulador, la existencia de cartografía básica reciente, sensores remotos actualizados, expediente municipal e indicadores de seguimiento y evaluación, procesados a 2020]

\*\*\* 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 categorizadas como áreas con condición de amenaza o riesgo en el PBOT.

\*\*\*\* Los tiempos establecidos en este cronograma son sugeridos, corresponden a tiempos aproximados, contados 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 planteamiento urbanístico y disposiciones normativas vigentes al momento de la radicación de la solicitud de licenciamiento.

Figura 34: Cronograma aproximado de ejecución para un escenario de modificación excepcional de norma urbanística

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

- Su incorporación en debida forma al EOT haría que el antiguo ETCR quede armonizado normativamente con el resto del territorio municipal, surtiendo debidamente todas las etapas de divulgación, participación y concertación con los actores institucionales y la comunidad en general.
- El procedimiento de modificación excepcional de norma urbanística está contemplado en el Decreto 1077 de 2015 en su artículo 2.2.2.1.2.3.4 el cual permite hacer la modificación de alguna o algunas de las normas urbanísticas de carácter estructural o general del plan.
- El proceso de modificación excepcional puede agilizarse en la medida en que las entidades participen, concerten y aprueben el proyecto de EOT en un corto tiempo sin hacer uso de los términos máximos permitidos por la ley 388 de 1997.
- Se debe tener presente que el Concejo Municipal puede efectuar cambios al proyecto de Acuerdo que se presente, excepto en aquellos asuntos de concertación ambiental a menos que sea más restrictivas, 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 medianamente rápido, 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 EOT.

### **2.2.2.3. Creación de un marco normativo excepcional para proyectos de vivienda y usos complementarios para el proceso de reincorporación**

Es claro que las dos rutas antes estudiadas requieren ajustes en el instrumento de planificación municipal, lo cual implica el agotamiento de una serie de etapas que pueden tomarse varios años, lo cual afecta el interés de las diferentes partes en generar soluciones de viviendas en los ETCR de manera rápida y oportuna, entendiendo la precariedad y ocupación provisional de las diferentes familias.

Debido a la problemática antes planteada, una tercera opción es tramitar ante el Congreso una Ley que permita al Presidente de la República, por una sola vez y amparado en el interés constitucional de alcanzar la Paz, producto de los acuerdos de la Habana entre el Gobierno Nacional y las antiguas FARC-EP, 1) Autorizar al Gobierno Nacional por ministerio de la ley, a la construcción proyectos de vivienda y usos complementarios para el proceso de reincorporación sin necesidad de contar con la autorización de los Concejos Municipales vía POT, así mismo dicha ley debe 2) Permitir a Notarios la suscripción de Escrituras Públicas de Subdivisión de inmuebles y Constitución de Reglamentos de Propiedad Horizontal -RPH-.

En la Figura 35 se presenta un posible cronograma de ejecución del proyecto habitacional en un escenario de Ley como punto de partida y culminando con la entrega de viviendas de interés social rural.



En este escenario de Ley se recomienda tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Un proyecto de Ley de Vivienda de esta naturaleza es muy posible que se apruebe ante el interés nacional que existe de dar cumplimiento a los Acuerdos de la Habana por parte del Gobierno Nacional.
- Se Se viabilizaría en un menor término el licenciamiento del proyecto de vivienda.
- Por economía procesal este sería el camino más expedito para lograr la incorporación de los antiguos ETCR en el ordenamiento territorial.
- El compromiso adquirido por el Gobierno Nacional en el sentido de suministrar la norma urbanística para la incorporación de los antiguos ETCR a los planes de ordenamiento territorial viabilizaría el licenciamiento y ejecución del proyecto de vivienda esperado.
- La materialización del proyecto de vivienda una vez el Gobierno Nacional suministre las normas urbanísticas a que hace alusión el artículo 33 del Proyecto de Ley de Vivienda, requerirá ser incorporado al ordenamiento territorial y a su adecuada implementación.

#### 2.2.2.4. Posturas jurídicas frente a la revisión de los POT

A continuación 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 más flexible, 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 6° 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 temporalidad 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.”

### 2.2.3. Caracterización y análisis general de la norma territorial del municipio de Icononzo

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.

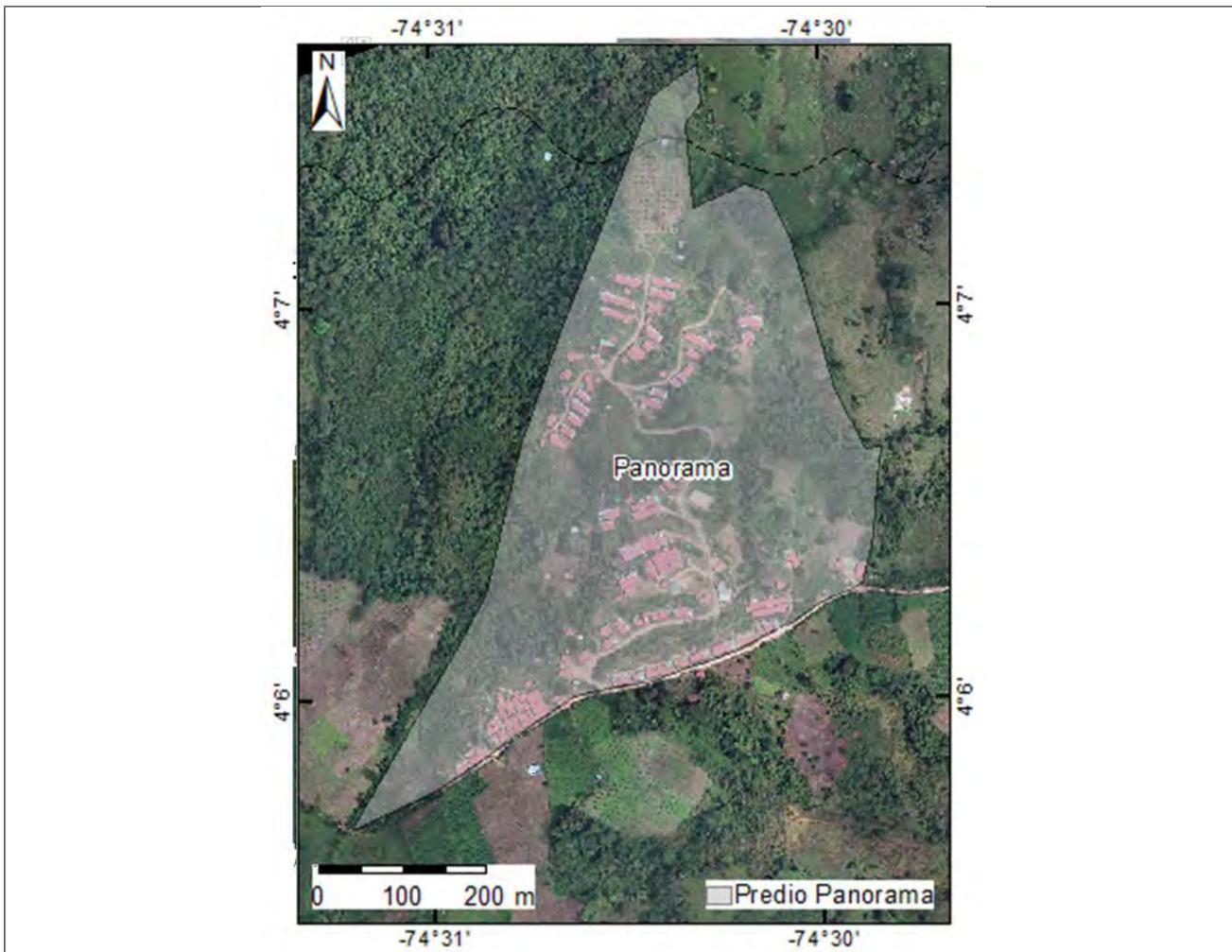
Así mismo, desde el punto de vista jurídico se presenta el estudio de tenencia del predio donde se encuentra el antiguo ETCR La Fila , cuyo análisis se hace a partir de la revisión de los títulos de adquisición como también del folio de matrícula inmobiliaria o certificado de tradición, a fin de establecer 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.

#### 2.2.3.1. Análisis de tenencia antiguo ETCR La Fila

En la siguiente tabla se presenta el estudio de títulos realizado al certificado de tradición del predio Panorama, donde se tiene previsto localizar el proyecto de vivienda.

Tabla 2: Análisis de la propiedad al inmueble Panorama.

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



**Figura: Antiguo ETCR La Fila (Municipio de Icononzo)**

Predio Panorama - Descripción Jurídica

Escritura 1534 del 26 de Octubre de 1993 Notaria de Melgar.  
 Cartografía Básica Digital Integrada. República de Colombia.

Escala 1:25.000. IGAC

Departamento:	Tolima
Municipio	Icononzo
Vereda	La Georgina y La Fila
Nombre del Predio	Finca panorama
Tipo de Predio	Rural
Código Catastral	733520002000000080191000000000
Área según catastro	22 HA + 8.543 m <sup>2</sup>
Área según título	22 HA + 8.543 m <sup>2</sup>

Folio Matricula Inmobiliaria	366-25191
Fecha de Apertura del folio	05-04-1994
Documento y/o acto jurídico por el cual se da apertura el FMI	Escritura 1534 del 26-10-1993 de la Notaría de Melgar
Estado del folio	Activo
Folio Matriz	366-4212, 366-12229, 366-12231
Folios segregados	Ninguno
Nombre Propietario(s)	Agencia Nacional de Tierras - ANT 9009489538 100 %
Naturaleza Jurídica	Publico
<p><b>Linderos:</b> Tomados del certificado de tradición y libertad.</p> <p><b>Lindero 1:</b> NORTE: En distancia de 616.18 ML con predio San Antonio.</p> <p><b>Lindero 2:</b> ORIENTE: En distancia 163.99 ML con vía veredal.</p> <p><b>Lindero 3:</b> SUR: En distancia de 682.07 mts con vía veredal y con predios de Oscar y Alba Lucia Otero en 2.209,40 m.</p> <p><b>Lindero 4:</b> OCCIDENTE: Con quebrada en distancia de 1.007.79 m.</p>	
<p><b>Concepto:</b> El actual propietario del inmueble es la Agencia Nacional de Tierras- ANT quien adquirió el inmueble por compraventa realizada al señor Luis Fernando Zorro Pineda, mediante Escritura Pública 643 del 06 de agosto de 2020 de la Notaría Única de Melgar, debidamente registrada en la anotación 09 del certificado de tradición.</p> <p>Limitación: El predio registra declaratoria de ronda hídrica (Decreto 1075 de 2015) sobre un área protegida de 2 HA + 8.230 m<sup>2</sup>. Declaración efectuada por la Escritura Pública 643 del 06 de agosto de 2020 de la Notaría Única de Melgar, registrada en la anotación 10 del certificado de tradición</p> <p>La tradición se encuentra ajustada a derecho, es consecuencia de una cadena lógica de dominio, el predio se encuentra libre de gravámenes, embargos, medidas cautelares, títulos de falsa tradición y afectación a vivienda familiar. Por lo tanto, es un predio que desde el punto de vista jurídico se encuentra saneado. Se realizó estudio de títulos al folio de matrícula inmobiliaria No 366-25191 del 17-09-2020. Total anotaciones 10.</p>	

**Observaciones técnicas:** Área definida según informe de generación y análisis de información geográfica y topografía elaborada por la Agencia Nacional de Tierras, que corresponde a los linderos descritos en la escritura 1534 del 26-10-93 Notaria de Melgar.

### 2.2.3.2. Caracterización general físico espacial

El antiguo espacio territorial La Fila se encuentra a 15 Km del área urbana del Municipio de Icononzo. La población inicial determinada para conformar este espacio fue de 319 personas (según la ARN se tiene una potencial demanda de personas en reincorporación para atención con vivienda de 225 (Agencia para la Reincorporación y la Normalización, 2020)), lo cual permite evidenciar la consolidación de un asentamiento nucleado que difiere de las características propias del entorno rural disperso y productivo.

Las viviendas actuales cuentan con servicio de agua, energía eléctrica y están construidas con materiales livianos asociados al espíritu transitorio con el que fueron concebidas para la fase inicial del asentamiento. Los módulos de viviendas en su gran mayoría tienen espacios compartidos como por ejemplo los baños que son de uso común. Además, al interior de dichos módulos también se presentan infraestructuras de apoyo como aulas de clase, biblioteca, salón comunal, guardería, comedor, cancha, auditorio, zona de recreación con billar pool, tejo, tienda y otros usos comerciales de menor escala.

El asentamiento no cuenta con urbanismo, paisajismo y dotación acorde a las necesidades de la comunidad. Al ser un asentamiento con una población considerable, existe demanda de servicios básicos como centro de salud, colegio y espacio para el cuidado de niños y niñas en edad preescolar. De igual manera se requieren espacios adecuados para la localización de actividades complementarias al uso habitacional que complemente las dinámicas propias del asentamiento, que en la actualidad se vienen presentando pero que por la insuficiencia de espacios deben ser localizados en los módulos habitacionales, estos son: hospedaje, restaurante y actividades productivas.

En relación a las actividades productivas, según testimonios de habitantes del asentamiento, contaban con una planta de elaboración de cerveza que fue reubicada por no cumplir los requisitos para su localización en términos de usos

del suelo y licencias sanitarias. Esto evidencia la necesidad de considerar las actividades o usos complementarios al interior del asentamiento, en este caso los productivos, toda vez que esto permite -generar un mayor dinamismo económico y social de la población al interior del antiguo ETCR.

### **2.2.3.3. Norma general territorial aplicable al predio.**

Como se mencionó anteriormente el municipio de Icononzo cuenta con los siguientes Acuerdos municipales:

**Acuerdo 003 de Enero 29 de 2007** por medio del cual se adopta el Esquema de Ordenamiento Territorial municipal (EOT), se definen los usos del suelo para las diferentes zonas de los sectores rural y urbano, se establecen las reglamentaciones urbanísticas correspondientes.

**Acuerdo 004 de Marzo 02 de 2014** por medio del cual se hace un ajuste excepcional al Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) del municipio de Icononzo- Tolima adoptado mediante el Acuerdos 003 de Enero 29 de 2007 y se dictan otras disposiciones.

**Acuerdo 006 de Agosto 31 de 2016** por el cual se modifica el Artículo 57 del Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) del Municipio de Icononzo (Acuerdo 003 de Enero 29 de 2007).

El Acuerdo 004 de 2014 incorporó únicamente al perímetro urbano, suelo rural, suelo suburbano y suelo de expansión urbana para el desarrollo y construcción de vivienda VIS y VIP. (Fig 36) Lo cual no incide en la zona objeto de análisis. (Fig 36).

Por su parte el Acuerdo 006 de 2016 se expidió para modificar el Artículo 57 del EOT inicial. Sin embargo el contenido de este Acuerdo se evidencia que la modificación anunciada no se efectuó y el artículo 57 se mantuvo en los mismos términos y contenidos del Acuerdo 003 de 2007.

Por lo tanto el análisis normativo territorial se realiza con lo dispuesto en el Acuerdo 003 de 2007.

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

#### **Normas urbanísticas municipales.**

##### **Clasificación suelo.**

Suelo Rural: 13,98 Ha.

Suelo de Protección- Rural: Paisaje Natural, Bosque Plantado (RC): 8,87 Ha (Fig 36).

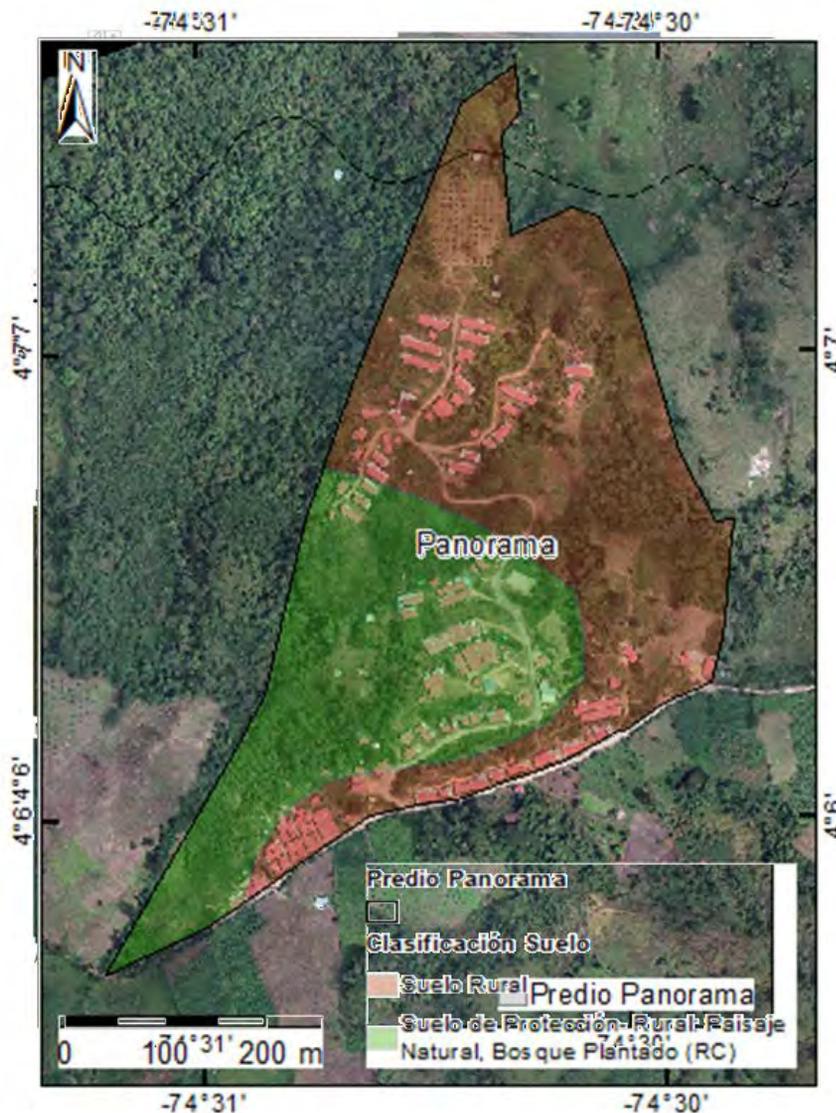


Figura 36: Clasificación Suelo en el antiguo ETCR La Fila (Municipio de Icononzo). Fuente: EOT. Plan Nacional de Restauración Ecológica (PNR). SIAC (REAA - MADS).

### Usos del suelo

Dentro de la zonificación del suelo rural se establecen las **unidades de producción económica**, según la oferta ambiental, el uso potencial y los usos recomendados que para el caso del predio objeto de estudio aplican las siguientes:

**Zona de producción agroforestal:** Bosque con rastrojo y pastos (16,81 Ha)

**Zona de producción agrícola:** Café con plátano (6,05 Ha).

El artículo 52 del EOT define los usos para dichas áreas:

- **Uso principal.** Agricultura tradicional/ tecnificada con sombrío.
- **Uso compatible.** Vivienda del propietario y trabajadores, establecimientos institucionales de tipo rural, granjas avícolas y cuniculturas.
- **Uso condicionado.** Piscicultura, granjas porcinas, embalses, recreación general y cultural. Vías de comunicación, infraestructura de servicios, agroindustria, parcelaciones rurales siempre y cuando no resulten predios menores de 4 hectáreas y explotaciones gravilleras, canteras o similares cuando el interés social lo exija, previo estudio de impacto ambiental.
- **Uso prohibido.** Agricultura mecanizada, minería a cielo abierto, **usos urbanos y suburbanos**, industria de transformación y manufacturera, **y loteo con fines de construcción de vivienda.**

**Determinantes de ordenamiento territorial.**

**Suelo de Protección- Rural:** Paisaje Natural, Bosque Plantado (RC) (7,26 Ha).

Son áreas de especial significancia ambiental que necesitan ser conservadas o protegidas por razones ecológicas o culturales y que se caracterizan por su relieve ondulado, escarpado, con suelos predominantes pedregosos y superficiales. De mediana a baja calidad agrológica.

**Reserva Forestal:** (Figura 37) Registro de Ecosistemas y Áreas Ambientales REAA: Portafolio de Restauración: Recuperación Nivel 2. (21,47 Ha). Fuente: MADS

Plan Nacional de Restauración Ecológica (PNR): Rehabilitación Nivel 2. (1,04) Ha. Fuente: SIAC (REAA - MADS)

**Líneas de alta tensión:** No se encuentran infraestructuras asociadas

**Cuerpos de agua:** Quebrada (lindero occidental). Fuente: Matricula Inmobiliaria

**POMCA:** No aplica (NA)

**Retiros hídricos o rondas:** Declaratoria de rondas hídricas (Decreto 1076 de 2015): (2,823) Ha. Escritura 643 del 06/08/2020 Notaría Única de Melgar.

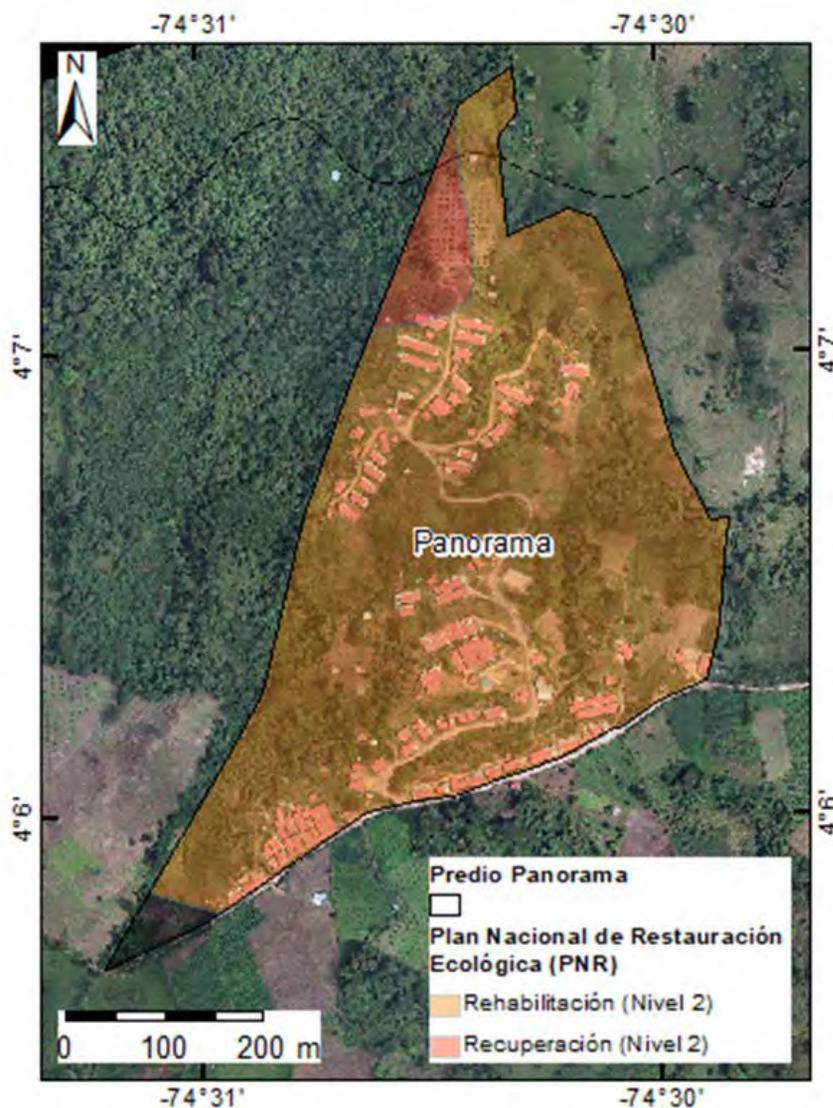


Figura 37: Reserva Forestal en el antiguo ETCR La Fila (Municipio de Icononzo). Fuente: - Cartografía EOT - Municipio de Icononzo. Plan Nacional de Restauración Ecológica (PNR). SIAC (REAA - MADS). Cartografía Básica Digital Integrada. República de Colombia. Escala 1:25.000. IGAC.

Fuente: Matricula Inmobiliaria

**Amenazas:** El predio no tiene amenaza o conflictos de usos del suelo

**Resguardo indígena:** No se traslapa con resguardo indígena

**Vías:** El predio no tiene presencia de vías de primer, segundo y tercer orden.

**Intensidades de usos según norma urbanística.**

**Densidades:**

Para parcelación y construcción rural aplica la UAF de 4 Has. Sin embargo,

se establecen las siguientes excepciones (Artículo 57):

- Las donaciones que el propietario de un predio de mayor extensión haga con destino a habitaciones campesinas y pequeñas explotaciones anexas.
- Los actos o contratos por virtud de los cuales se constituyen propiedades de superficie menor a la señalada para un fin principal, distinto a la explotación agrícola.
- Los que constituyan propiedades que por sus condiciones especiales sea el caso de considerar, a pesar de su reducida extensión, como UAF, conforme a la definición establecida previamente (Ley 160 de 1994, artículo 45)
- Las sentencias que declaren la prescripción adquisitiva de dominio por virtud de una posesión iniciada antes del 29 de diciembre de 1961, y las que reconozcan otro derecho igualmente nacido con anterioridad a dicha fecha.
- Las parcelaciones rurales en predios que no se destinan a reforma, deberán tener en cuenta, por lo menos las siguientes normas (Artículo 57):
  - La densidad de vivienda en cualquier área de la zona rural responderá a criterios de la oferta ambiental (recurso hídrico, contaminación de aguas y disponibilidad de suelos sin amenaza mitigable), ya sea definido en el Plan de Ordenamiento o por estudios y disposiciones posteriores de la Autoridad Ambiental.
  - Toda vivienda deberá tener el vertimiento de las aguas residuales a una red de alcantarillado aprobada por las Empresas Municipales de Servicios Públicos o verter esas aguas a pozos sépticos cuya construcción estará definido por criterios técnicos de la autoridad ambiental.
  - No se permitirán construcciones de viviendas que conlleven la tala de relictos boscosos, salvo que se presente una propuesta de compensación con la autoridad ambiental.
  - Toda vivienda que no esté cubierta por las rutas establecidas por las Empresas Públicas Municipales deberá contar con una adecuada disposición final de residuos sólidos.
  - Toda vivienda deberá ceñirse en las normas de construcción a lo establecido en los códigos sismo resistentes y en ningún caso podrán construirse en zonas de alto riesgo por inundaciones o geomorfológico.

- Toda vivienda y edificación rural, aislada o concentrada, deberá respetar los aislamientos hacia las vías, cuerpos de agua y demás zonas de protección establecidas en este Acuerdo.
- Los planes de vivienda rural concentrada, definido como el conjunto de viviendas mayor de cinco unidades en todas las etapas en que dicho plan pueda construirse, además de someterse a los anteriores criterios ambientales, deberá disponer de los siguientes aspectos:
  - El urbanizador construirá por su cuenta la vía de acceso desde cualquier tipo de vía del municipio, considerando las condiciones de estabilidad y pendientes definidas por la Oficina de Planeación Municipal.
  - El urbanizador construirá y dotará de servicios públicos a la totalidad de las viviendas; estos servicios deberán ser aprobados por la Empresa Municipal de Servicios Públicos.
  - En caso de ser necesario, la Autoridad Ambiental podrá exigir al urbanizador los estudios ambientales necesarios para garantizar la estabilidad de las obras y la sostenibilidad de los recursos demandados por la población de dicha urbanización, especialmente el recurso hídrico.
  - Se debe mantener el carácter rural del predio, el uso principal y el globo como unidades indivisibles. Mínimo cuatro (4) hectáreas.
- Para parcelaciones en predios mayores a cuatro (4) hectáreas se podrán construir conjuntos de viviendas con un número máximo de viviendas por hectárea y una ocupación máxima del predio que se determinan a continuación de acuerdo con la zona en la cual se pretende desarrollar el proyecto:  
**Zona:** Agricultura Tradicional.

### **Número Máximo de viviendas Por Ha (densidad):**

Dispersas: 1

Agrupadas: 2

### **Ocupación Máxima del área del predio (Índice de ocupación):**

Dispersas: 15 %

Agrupadas: 20 %

## Número Máximo de viviendas Por Ha (densidad) 1 v.

En el parágrafo 1 del Acuerdo se define por ocupación máxima del predio, el área de construcciones tanto cubiertas como descubiertas. Las densidades y los índices de ocupación se deben calcular sobre el área total del predio que se pretenda destinar para el uso de parcelación excluyendo los otros usos.

La parcelación deberá manejarse como un globo de terreno con reglamento de copropiedad, el cual debe ser aprobado por la Corporación Autónoma Regional del Tolima “Cortolima”.

Presentar a la Corporación Autónoma Regional del Tolima “Cortolima” el correspondiente Estudio de Impacto Ambiental, de acuerdo con los términos de referencia suministrados por la entidad.

Para efectos de usos institucionales, incluyendo los clubes sin vivienda, se podrá autorizar cambio de uso del suelo, hasta en un 30 % del área total del predio, en las zonas donde estos usos estén considerados como compatibles o condicionados.

### 2.2.3.4. 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 38, 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 EOT.

Icononzo establece en su EOT para el predio Panorama un área mínima de lote de 4ha por parcela con una sola vivienda, es decir una densidad de 1 viv/ha.

En la Tabla 3, tabla se presentan los resultados que arroja el cálculo de densidades sobre el predio Panorama luego de aplicarle las normas anteriormente descritas:

Tabla 3: Norma urbanística general para el suelo rural. Fuente: EOT.

INFORMACIÓN PREDIAL	ICONONZO
Nombre del predio	Panorama
Área jurídica (Fuente: Matricula Inmobiliaria)	22 Ha + 8.543 m <sup>2</sup>
Área Dibujo	22,85 Ha
Intensidades de usos según norma urbanística	
<b>Densidades</b>	
<b>Para parcelación y construcción rural</b>	UAF de 4 Has. Fuente:EOT.
Número Máximo de viviendas Por Ha (densidad)	1
Dispersas	1
Agrupadas	2
Dispersas	15 %
Agrupadas	20 %
<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)	22,85
Área no urbanizable (restricciones)	15,59
Área neta urbanizable	7,26
Total aprovechamiento máximo (viviendas)	7

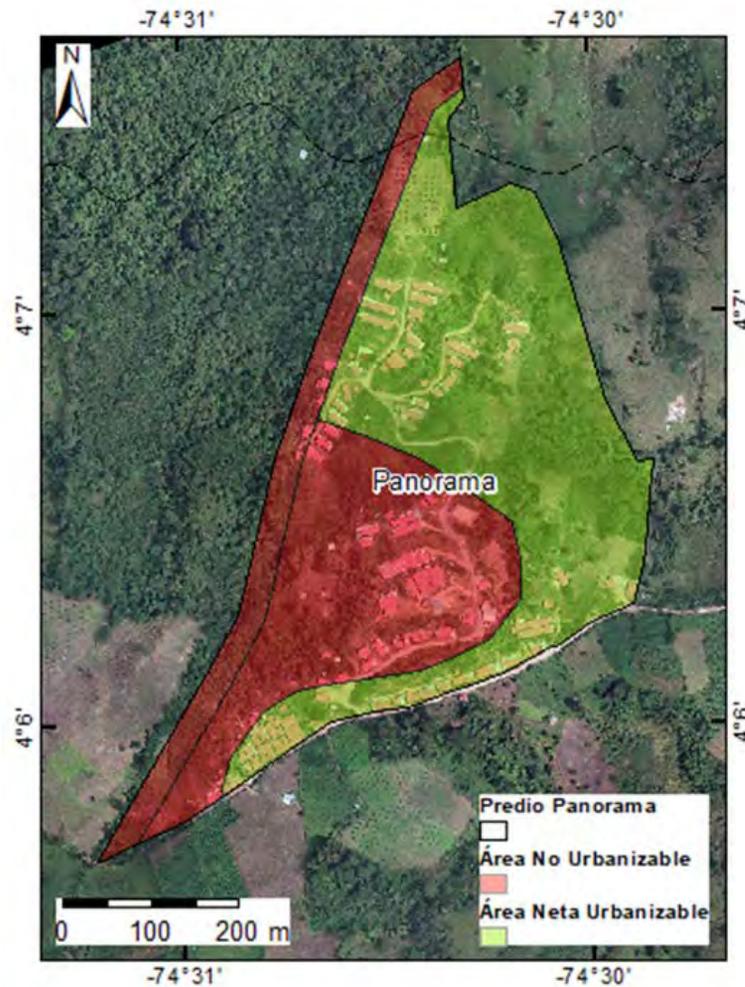


Figura 38: Área Neta Urbanizable en el antiguo ETCR La Fila (Municipio de Icononzo). Fuente: Cartografía EOT - Municipio de Icononzo.

De acuerdo a estos resultados y de cara a la viabilización del proyecto de vivienda del antiguo ETCR Panorama en el predio objeto de estudio, donde con la norma urbanística vigente el aprovechamiento máximo es de 7 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 2.2.2.2.2.1 del Decreto Nacional 1077 de 2015, así como una concertación de densidades rurales con la CAR, quién tiene la competencia de su definición en los términos del Numeral 31, Artículo 31 de la Ley 99 de 1993.

### 2.3. Conclusiones

A partir de los resultados de la evaluación del predio en el marco de la normativa territorial existente se presentan estas conclusiones de cara a una adecuada

planeación, formulación y ejecución del proyecto habitacional a implementarse en el antiguo ETCR.

En este orden de ideas, 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 convirtieron en elementos que inciden al momento de aplicar la norma en cuanto a densidades, usos del suelo y restricciones de tipo ambiental. Aunado a lo anterior, el modelo de enclave 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.

Por lo anterior, es de suma importancia, que las autoridades municipales adelanten el ajuste del Instrumento de Ordenamiento Territorial, con la finalidad de viabilizar el antiguo ETCR normativamente como parte de su territorio, con una mirada integral, logrando una articulación armónica de éste con un entorno que posee características que los destacan por su ubicación estratégica, asociadas a zonas de importancia ambiental y cultural.

La incorporación de los antiguos espacios territoriales a la norma urbanística presupone una planificación con visión de futuro que autorice su consolidación como conglomerado o asentamiento humano en suelos donde la norma les posibilite lógicas de crecimiento, productividad y dinámicas propias al contexto.

Las anteriores conclusiones corresponden a una mirada general de los ámbitos normativo y espacial del antiguo ETCR, por lo tanto, a continuación se presentan de manera puntual unas **conclusiones propositivas** de cara a lograr la viabilización del proyecto urbanístico en el predio donde se albergará la población del antiguo ETCR del municipio de Icononzo:

- El predio Panorama se encuentra en suelo rural, condicionado parcialmente como suelo de protección asociado a la categoría de paisaje, bosque plantado. Para las áreas restantes del predio que son rurales se le asigna como uso principal la agricultura tradicional tecnificada con sombrío, permitiendo de forma condicionada las parcelaciones rurales siempre y cuando no resulten predios menores de 4 hectáreas, quedando prohibidos los usos urbanos y suburbanos, además de los loteos con fines de construcción de vivienda. Conllevando con esto a solo permitir la vivienda del propietario y trabajador.
- Los suelos de protección contenidos en el predio son áreas de especial significancia ambiental que necesitan ser conservadas o protegidas según el

EOT por razones ecológicas o culturales.

- En el predio en su costado occidental se localiza una franja de ronda hídrica, la cual debe ser objeto de protección.
- Se debe mantener el carácter rural del predio, de acuerdo con el uso principal establecido con una UAF de 4 hectáreas.
- Dado que en el Plan de Desarrollo del municipio de Icononzo 2020- 2023 “Porque Icononzo somos todos” Decreto Nro 047 de 2020 no contempla claramente la revisión del EOT por lo cual éste deberá ajustarse para incorporar lo correspondiente para efectos de viabilizar los recursos que permitan la contratación de todos los estudios técnicos y el equipo profesional que se requiera.
- Necesariamente para la viabilización del antiguo ETCR se tendrá que acoger una de las rutas normativas que se han dejado plasmadas en el presente documento y que van desde revisión ordinaria del EOT, la modificación excepcional de norma urbanística o el trámite extraordinario de aprobación de normas urbanísticas.

Dado que a la fecha de elaboración de este estudio se tiene conocimiento de la expedición de una Ley de Vivienda que viabiliza normativamente los antiguos ETCR y establece las pautas para su incorporación en los planes de ordenamiento territorial, al señalar que el Gobierno Nacional entregará la información pertinente, la cual incluirá las normas urbanísticas básicas para la consolidación de los antiguos ETCR, con el fin de que sea tenida en cuenta en el proceso de revisión y ajuste de los Planes de Ordenamiento Territorial de los municipios. En este sentido, una vez la obligación adquirida por el Gobierno Nacional se cumpla, el alcalde de cara a la expedición de la licencia deberá acoger lo reglado en la disposición que para el efecto se expida.

- En el evento de optarse por realizar una revisión ordinaria o de largo plazo, del EOT con el fin de lograr la incorporación del antiguo ETCR en la norma territorial, se tendría que efectuar entre otros asuntos una modificación de la clasificación del suelo, así mismo 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. Así mismo, se deberá realizar una concertación de densidades rurales con

la CAR, quién tiene la competencia de su definición en los términos del Numeral 31, Artículo 31 de la Ley 99 de 1993.

- Otra posibilidad para la viabilización del antiguo ETCR en el menor tiempo posible es acoger lo dicho en el ítem de modificación excepcional de norma urbanística a fin de introducir un cambio 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 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.
- Otra opción es la incorporación del antiguo ETCR como Centro Poblado Rural, proyectado, lo cual requiere ajustar el Artículo 2.2.2.2.3.1, por cuanto dicha norma solo está concebida para categorizar dentro del EOT áreas habitacionales preexistentes a la formulación de dicho instrumento. Lo que significa, que escoger la categoría de suelo suburbano o centro poblado dependerá de la tipología de asentamiento que se defina en el antiguo ETCR.
- El antiguo ETCR brinda la oportunidad para que el ente territorial apoye decididamente la creación de un nuevo Centro Poblado que no se circunscriba solo al predio objeto de análisis de este estudio, sino que se explore la posibilidad de configurar una área mayor que involucre uno o más predios que permita prever el desarrollo y crecimiento futuro del asentamiento; lo cual obligará a que en el futuro se establezca desde la norma un planteamiento urbanístico que fije las directrices para un desarrollo planificado de este espacio territorial.
- El ajuste normativo que el municipio de Icononzo emprenda con miras a lograr la incorporación del antiguo ETCR al EOT deberá enfocarse mínimamente en la modificación e incorporación de los siguientes artículos, (ver Tabla 4), los cuales se consideran necesarios para el otorgamiento de las respectivas licencias urbanísticas de parcelación, construcción y autorización de subdivisión:

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

<b>ITEM</b>	<b>Disposición Principal Propuesta</b>	<b>Localización En el ajuste al PBOT</b>	<b>Observación</b>
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	Artículo nuevo después del artículo 15	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>			

Continuación de la tabla 4			
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 Art 51	Adopción mediante Acuerdo POT
Usos del suelo complementarios	Comercio menor Usos dotacionales (20 %ANU)	Nuevo artículo después del art 51	Adopción mediante Acuerdo POT
Antejardín	4m de ancho	Nuevo artículo	Adopción mediante Acuerdo POT
Densidades habitacionales	15 viv/ha	Ajustar Art 57	Disposición objeto de concertación ambiental y Adopción mediante Acuerdo POT
Área mínima de lote	500m <sup>2</sup>	Nuevo artículo	Adopción mediante Acuerdo POT

Continuación de la tabla 4			
Frente mínimo de lote	20m	Nuevo artículo	Adopción mediante Acuerdo POT
Índice máximo de Ocupación	30 % ANU	Nuevo artículo	Adopción mediante Acuerdo POT
Normas de construcción			
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 linderero	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
Final de la tabla			

- **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 es-

pacios 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 la más apropiada para llevar a cabo la formalización de los antiguos ETCR en el ordenamiento territorial municipal.

Con la expedición del Decreto 1077 de 2015 en el artículo 2.2.2.1.2.2.3 define como fecha de referencia el 31 de marzo de 2021 para que los municipios que se encuentren adelantando el proceso de revisión y ajuste de los POT antes de esta fecha lo puedan hacer cumpliendo con los contenidos establecidos en las normas vigentes antes de la modificación determinada por este Decreto. Por su parte los municipios que con posterioridad al 31 de marzo de 2021 inicien su proceso de revisión y ajuste de sus POT tendrán que acoger lo dispuesto por la mencionada norma.

Para los municipios que hayan emprendido la revisión y ajuste de sus POT

con anterioridad a la modificación introducida al Decreto 1077 de 2015 tendrán que incorporar en el proyecto de Acuerdo el antiguo ETCR localizado en su municipio como Centro Poblado rural de acuerdo a los criterios establecidos en los artículos 15 y 16 del Decreto 3600 de 2007. Cabe anotar que esta incorporación del antiguo ETCR en el POT implica que desde el componente general del Acuerdo se establezcan políticas, objetivos y estrategias que justifiquen la creación de estos espacios territoriales como Centros Poblados rurales, y posteriormente su incorporación efectiva en el componente rural, al igual que en los documentos soportes del proyecto de Acuerdo del nuevo POT.

Aquellos municipios que emprendan la revisión y ajuste de sus POT con posterioridad al 31 de marzo de 2021 tendrán que acoger lo dispuesto en el Decreto 1077 de 2015. En lo que respecta a la adopción de los antiguos ETCR como Centros Poblados rurales, su incorporación deberá contemplarse desde el Componente General del POT a través de sus contenidos estratégicos y estructurales. Y específicamente desde el Componente Rural, deberá acatar lo dispuesto en el artículo 2.2.2.1.2.1.3 literal C No. 7 y 11 que señalan lo siguiente:

7. La identificación de los centros poblados rurales y la adopción de las previsiones necesarias para orientar la ocupación de sus suelos y la adecuada dotación de infraestructura de servicios básicos y de equipamiento social.

11. Las normas para el desarrollo de vivienda en suelo rural para atender las necesidades de la población que habita esta clase de suelo, las cuales deberán tener en cuenta la legislación agraria y ambiental.

Además de la disposición anteriormente citada, los municipios tendrán que tener en cuenta lo establecido en los artículos 15 y 16 del Decreto 3600 de 2007 donde se define y regula el ordenamiento de los Centros Poblados rurales.

- **Propuesta de densidades para concertar con la CAR.** De cara a 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 La Fila.

De acuerdo con lo anterior, a modo de ejemplo y sustento para la concer-

tación de densidades con la CAR, se tomó como criterio la densidad del Centro Poblado El Trébol (Figura 39), por estar más cercano y de escala similar a la que se tiene previsto se convertirá el antiguo ETCR La Fila en el corto plazo.



Figura 39: Centro Poblado de referencia El Trébol (Icononzo)

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 (ver Tabla 5).

Tabla 5: Información Centro Poblado de referencia

AETCR	MUNICIPIO	NOM_CPOB	DATOS_ANM	AREA	STVIVIENDA	TPS16_HOG	STP27_PERS
ICONONZO	VENECIA (CUNDI- NAMAR- CA)	EL TRE- BOL	ZONA URBANA (CENTRO POBLADO)	10133,39121	49	47	112

**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

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, (ver Tabla 6):

Tabla 6: Cálculo de densidad del Centro Poblado de referencia

<b>Variables</b>	<b>Unidades</b>	<b>Dabeiba</b>
Nombre Centro Poblado referente		El Trébol
Área aproximada del centro poblado	ha	1,0133
Cantidad aproximada de viviendas	viv	49
Densidad habitacional referente	viv/ha	48,36

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 El Trébol.

Si la densidad de 48,36 Viv/Ha del Centro Poblado de referencia se aplicara para el área neta urbanizable del predio Panorama (antiguo ETCR La Fila) que tiene 7,26 Ha, en el predio se podrían construir un total de 351 viviendas.

# 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\\_la\\_fila.aspx](http://www.reincorporacion.gov.co/es/reincorporacion/Paginas/ETCRs/AETCR_la_fila.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.

#### 3.0.1. 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.

### 3.0.2. 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.
- 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.

### 3.1. Proyección poblacional

Actualmente, se establece una cantidad total de 319 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 equipo social, se tiene un número inicial de 319 viviendas que componen el antiguo ETCR La Fila y con una densidad poblacional de 3 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).

### 3.1.1. 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 Economico, 2000), pero debido a la falta de información sobre censos en el antiguo espacio territorial La Fila 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 957 habitantes (319 viviendas cada una con 3 habitantes) y una proyección planeada al año 2046, se encuentra un valor de población futura de **1090** 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	957
2021	962
2022	967
2023	971
2024	976
2025	981
2026	986
2027	991
2028	996
2029	1001
2030	1006
2031	1011
2032	1016
2033	1021
2034	1026
2035	1031
2036	1036
2037	1042
2038	1047
2039	1052
2040	1057
2041	1063
2042	1068
2043	1073
2044	1079
2045	1084
2046	1090

Con esta población futura estimada para el antiguo ETCR La Fila se realiza el cálculo de los caudales de diseño para cada uno de los sistemas de agua potable y saneamiento básico.

## 3.2. Caudales de diseño

Para la estimación de los caudales de diseño de los sistemas de acueducto y saneamiento básico de la antiguo ETCR La Fila, 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).

### 3.2.1. 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 es 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 120litros/habitante – 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 **120l/hab · 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:

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 **0,23 l/s** sin incluir pérdidas

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.

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 54 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 el antiguo ETCR.

<b>Actividad</b>	<b>Usos %</b>	<b>Litros/vivienda</b>
Agricultura (Aguacate Mora y Cafe)	30 %	16.2
Cría de animales (Ganado) Empresa Cervecera y Confecciones	70 %	37.8
<b>Total</b>	<b>100 %</b>	<b>54</b>

### 3.2.2. 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 La Fila de  $Q_D = 2,3 \text{ l/s}$ . 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 **2,5 l/s**.

### 3.2.3. 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:

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

El caudal de diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales para el antiguo ETCR La Fila es de **2,0 l/s** y no es objeto de mayoración por factores de mayoración de caudales según lo establecido en la resolución 0884 de 2018, artículo 42, numeral b).

### 3.2.4. Oferta hídrica

Esta sección presenta el cálculo para la estimación de la oferta hídrica de la fuente seleccionada para el abastecimiento del antiguo ETCR La Fila. Se estima el caudal ambiental y la disponibilidad de agua superficial a lo largo del año en diferentes condiciones hidrológicas.

#### 3.2.4.1. Descripción de la fuente hídrica

La fuente hídrica de la cual se proyecta captar el agua para el uso del antiguo ETCR La Fila se conoce como NN, es un cuerpo lótico de escorrentía superficial de agua dulce, de tipo nacimiento o nacedero. 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 40 se presenta el trazado de la cuenca hidrográfica correspondiente a

dicha captación, la cuenca tiene un área de drenaje de 0,36 km<sup>2</sup>. Por otra parte, en la Figura 41 se presenta una fotografía del sitio de captación.

Tabla 11: Características de la fuente abastecedora para antiguo ETCR La Fila

Características	Vegetación	Lecho	X	Y	Z (msnm)
Nacimiento de buena vegetación aguas arriba, cuenca pequeña no antropizada.	Vegetación alta y espesa	Lecho en material fino	950488,07	945686,44	1990

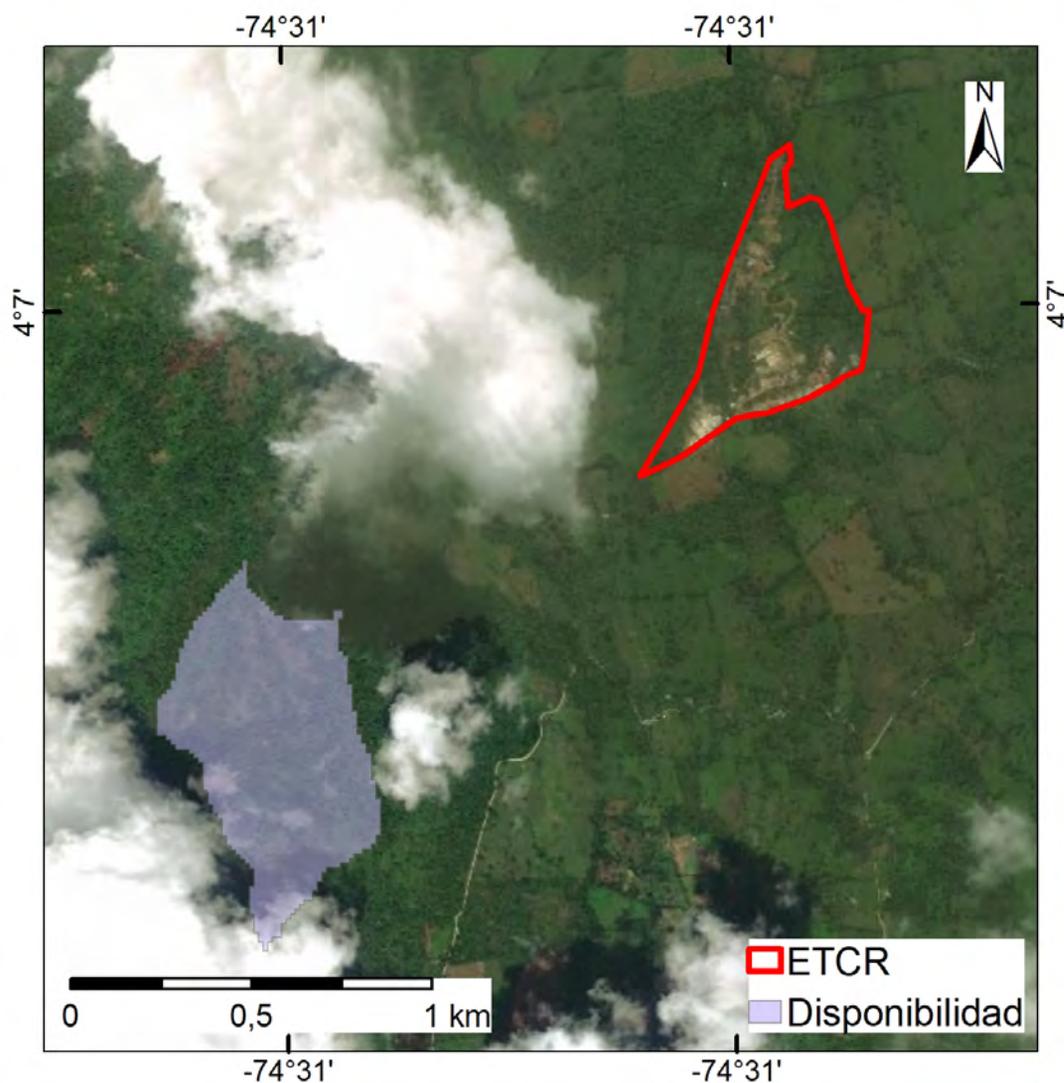


Figura 40: Cuenca del sitio de captación



Figura 41: Sitio de captación para el antiguo ETCR La Fila

#### 3.2.4.2. Cálculo de la oferta

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 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 Sumapaz (código 21197010) la cual se presenta en la Figura 42.

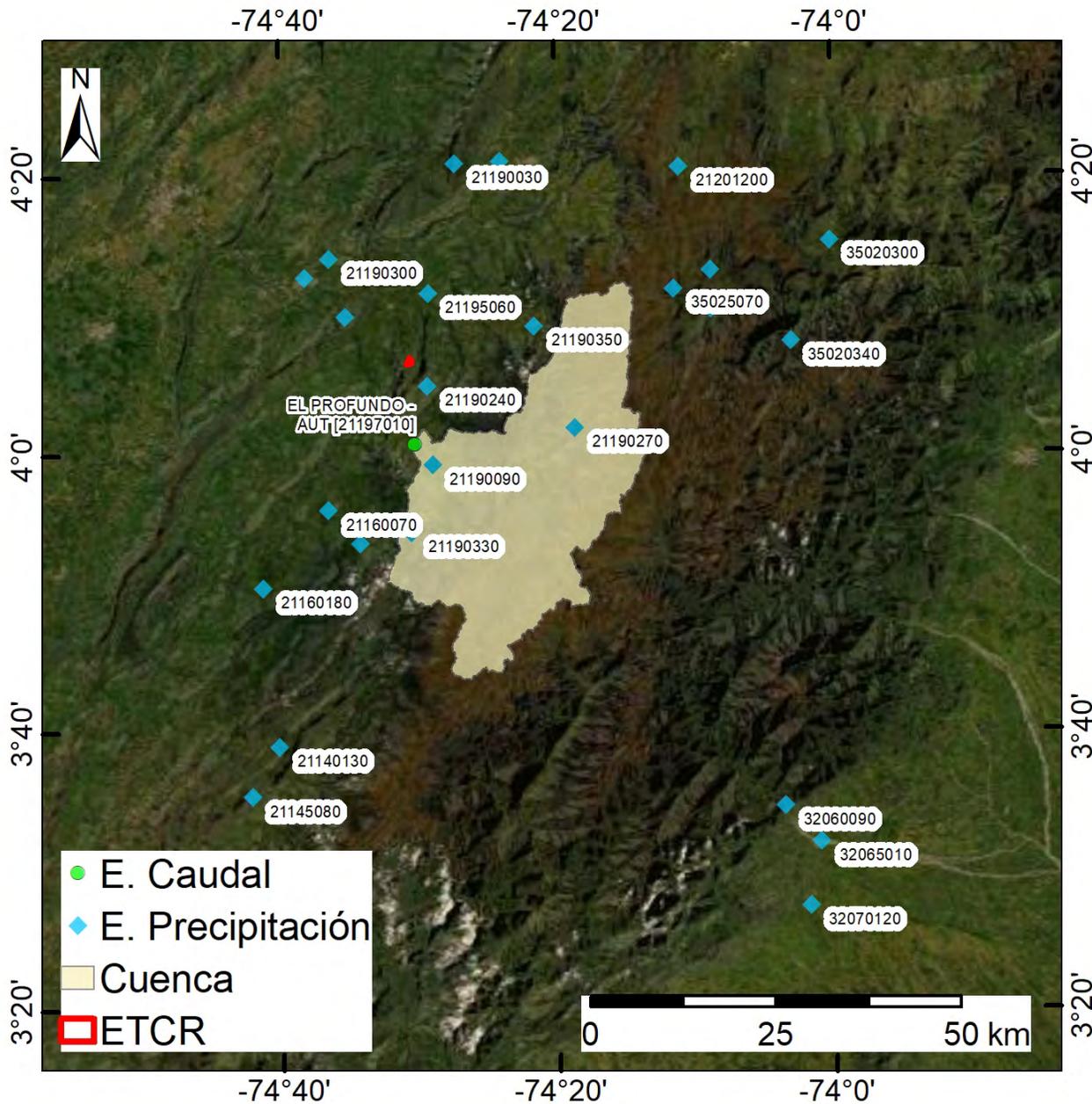


Figura 42: Cuenca e información hidroclimática empleada para la calibración del modelo

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 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 ( $X1$ ), 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 ( $Di$ ) parte del agua se distribuye: una parte se dirige a uno de los tanques, y otra continúa hasta los niveles inferiores ( $Xi$ ). 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 ( $Yi$ ), 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 43 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  $X1$  en el nodo  $D1$ . Parte del agua va a los conductos inferiores, y parte se almacena en el tanque. El primer tanque representa el 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 almacenada 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

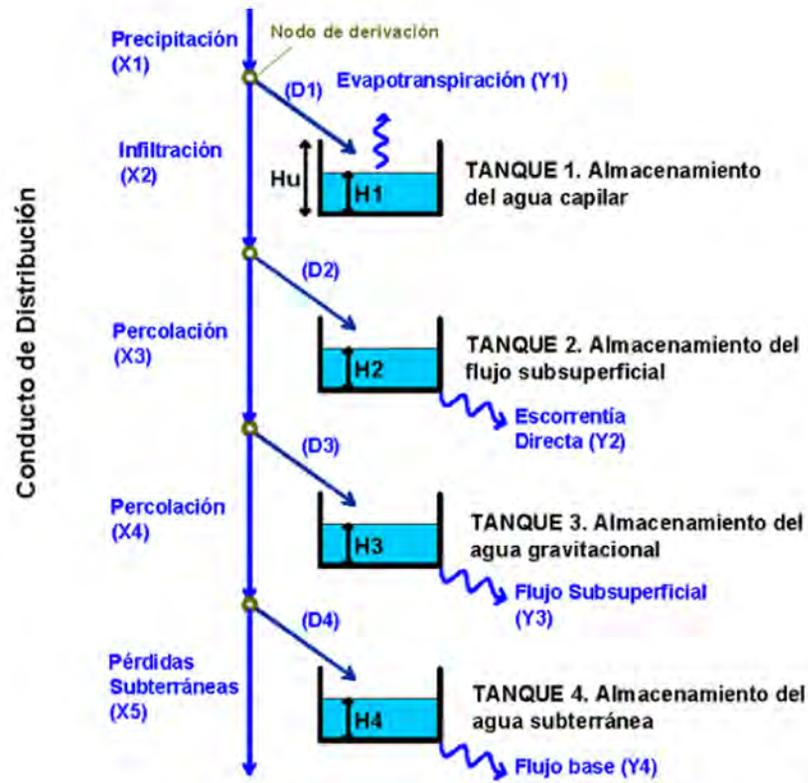


Figura 43: Esquema de funcionamiento del modelo

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 agua que entra al tanque es la que resulta luego de la derivación del excedente del almacenamiento capilar ( $X2$  - infiltración), y la que sale es la escorrentía directa ( $Y2$ ) 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 ( $Y3$ ). La cantidad de agua que entra a este tanque es la resultante de derivación en el nodo  $D3$ , la cual se asocia a la cantidad de agua que se filtra por percolación ( $X3$ ). 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  $T4$  se consideraría como el almacenamiento de agua dentro del acuífero, en donde se almacena el agua gravitacional antes de salir como flujo base ( $Y4$ ). 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 21197010, que envuelve la zona de estudio, se ubica sobre el río Sumapaz 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 Sumapaz es hidrológicamente similar a la microcuenca abastecedora del antiguo ETCR La Fila, logrando de esta manera cierta representatividad de los parámetros a escala regional. La calibración se realiza en el período temporal comprendido entre 1973 y 2015 (43 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.

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 44 se muestra la curva de duración de caudales (CDC) observada y estimada, la Figura 45 presenta la serie de caudales observados contra los estimados. En general los resultados del modelo son satisfactorios. En la Figura 46 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 47.

Tabla 12: Parámetros calibrados para el modelo de tanques

Parámetros	Valor	Mínimo Sugerido	Máximo Sugerido
Almacenamiento Máximo Capilar	236,80	20	600
Conductividad Capa Sup (mm/día)	50,32	1	100
Conductividad Capa Inf (mm/día)	2,18	0,01	10
Perdidas Subterráneas (mm)	0,63	0	10
Tiempo de Residencia Flujo Superficial (días)	10	1	10
Tiempo de Residencia Flujo Subsuperficial (días)	4,307	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)	146,11	0	2000

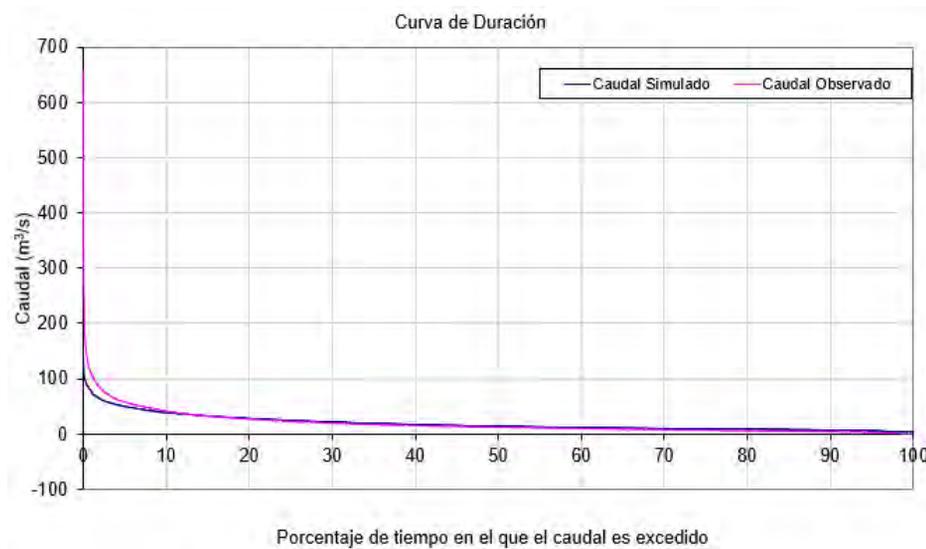


Figura 44: CDC entre la serie estimada y la observada

### 3.2.4.3. 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:

- (Método 1) Mínimo histórico: a partir de curvas de duración de caudales

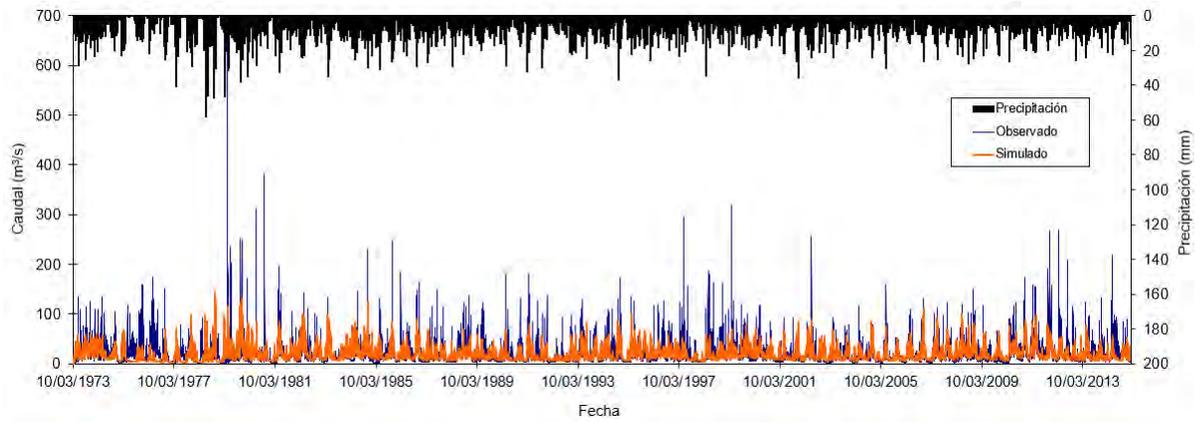


Figura 45: Serie de caudal estimada y observada

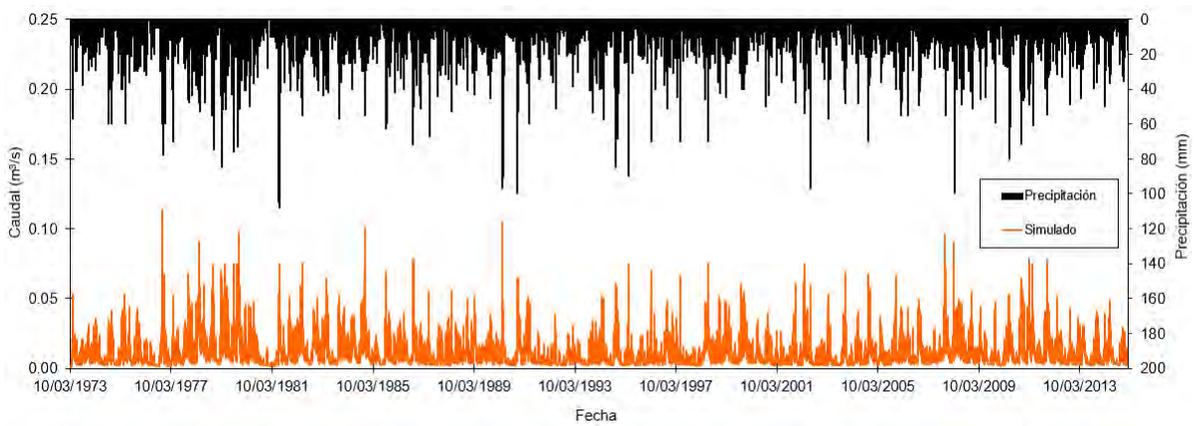


Figura 46: Serie de caudal sintética microcuenca abastecedora

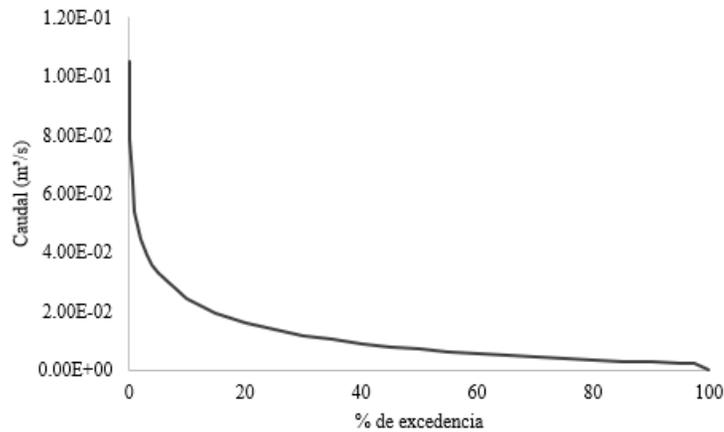


Figura 47: Curva de duración de caudales - microcuenca abastecedora

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

Tabla 13: Caudal ambiental microcuenca abastecedora

M1 (l/s)	M2 (l/s)	M3 (l/s)	Qeco (l/s)
2,12	1,54	2,76	2,76

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.

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.

#### 3.2.4.4. Disponibilidad hídrica

Se 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 48. En la Tabla 14 se presenta el cálculo de la oferta hídrica para la microcuenca. abastecedora.

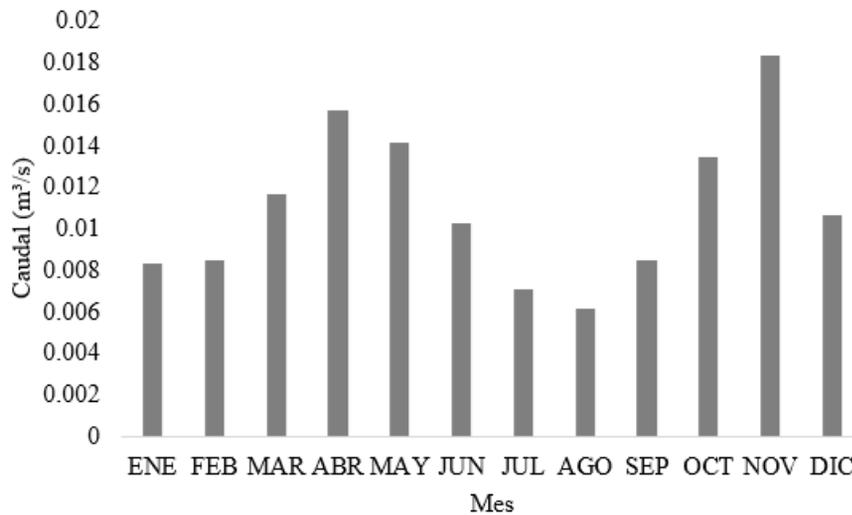


Figura 48: Ciclo anual de caudales en año medio para microcuenca abastecedora

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

Q Año seco (l/s)	Q Año medio (l/s)	Q eco (l/s)	Disponibilidad Año seco (l/s)	Disponibilidad Año medio (l/s)
3.0	11.1	2.8	0.2	8.3

### 3.3. 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.

#### 3.3.1. 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).

Parámetros	Fuente aceptable	Fuente regular	Fuente deficiente	Fuente muy deficiente
DBO 5 días:				
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

### 3.3.2. 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).

<b>Parámetro</b>	<b>Fuerte</b>	<b>Media</b>	<b>Débil</b>
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

### 3.4. 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.

### 3.5. 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.

#### 3.5.1. Proceso aerobio

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

### 3.5.2. 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.

### 3.5.3. 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 Económico, M. (2000). *Resolución 1096 de 2000, 17 de noviembre, por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico-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). *Resolución 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 ETCR 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 49.

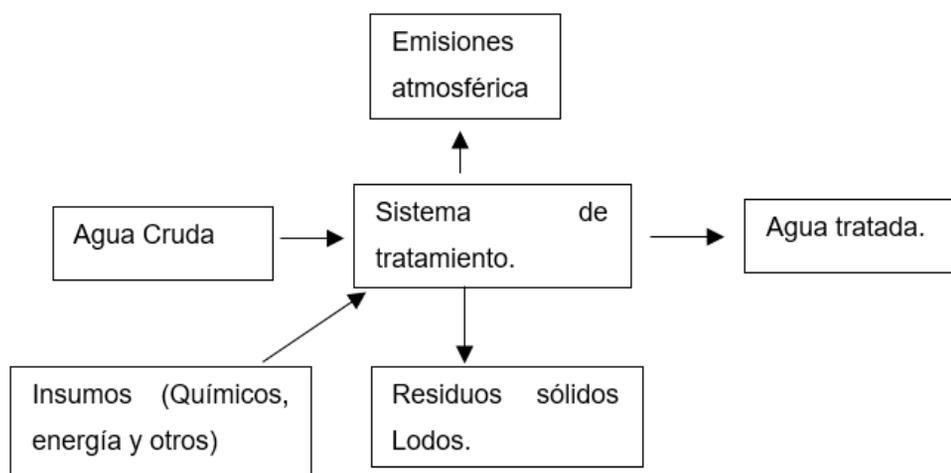


Figura 49: Balance de masas.

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 antiguos 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 50.

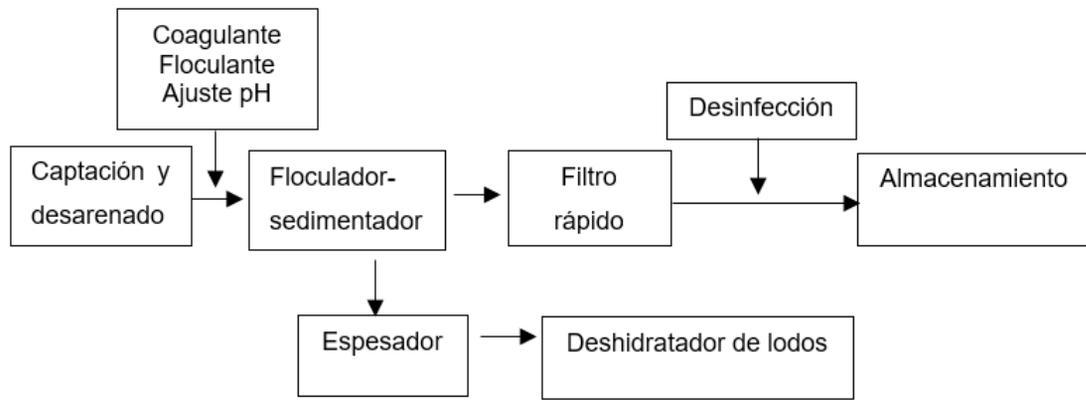


Figura 50: Tren tratamiento PTAP Alternativa 1.

#### 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 51), 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.

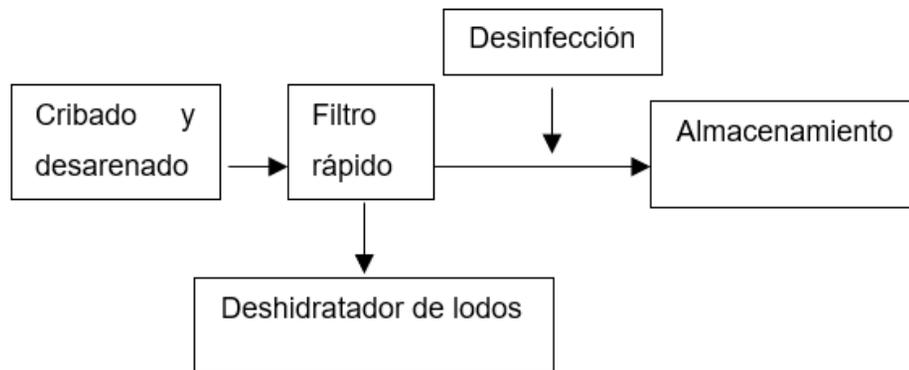


Figura 51: Tren tratamiento PTAP Alternativa 2.

### 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 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 52.

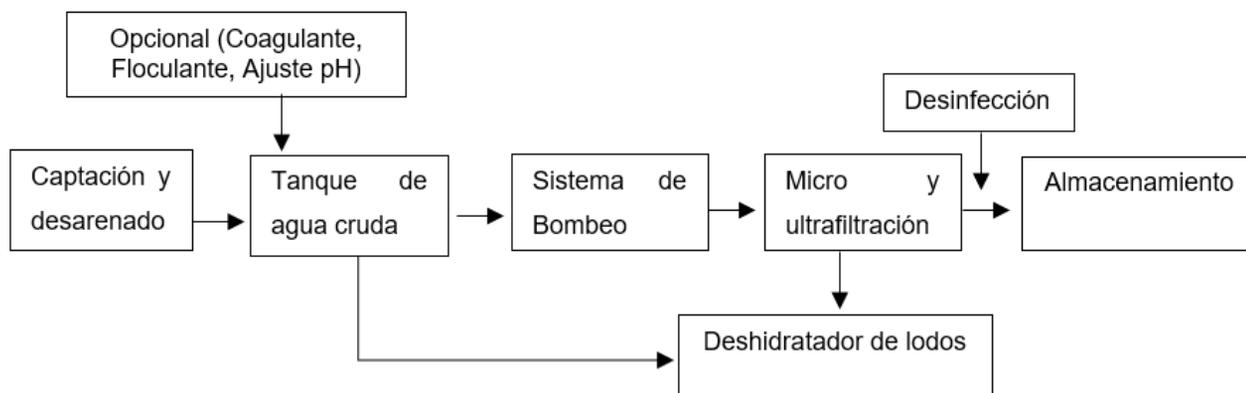


Figura 52: Tren tratamiento PTAP Alternativa 3.

## 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. 53).

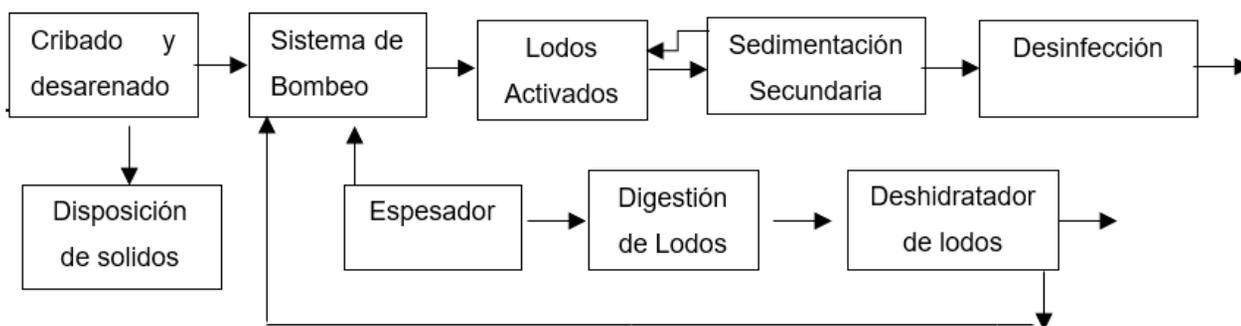


Figura 53: Tren tratamiento PTAR Alternativa 1.

#### 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 54.

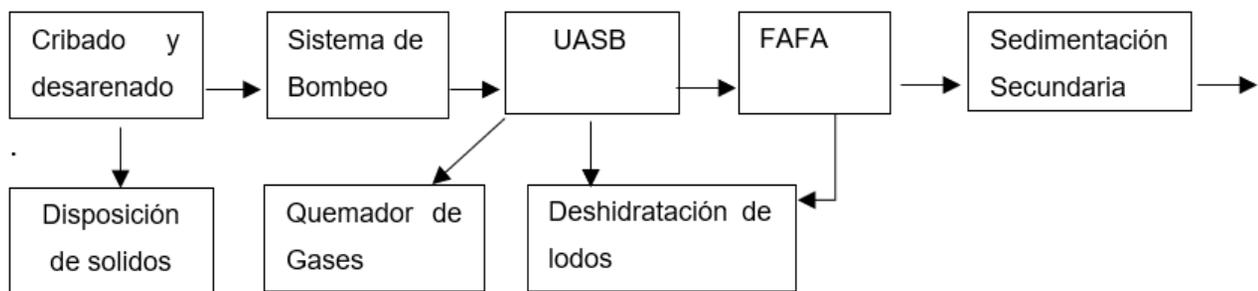


Figura 54: Tren tratamiento PTAR Alternativa 2.

#### 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 microbiológica compuesta por bacterias, algas y protozoos que conviven en forma simbiótica.

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 55.

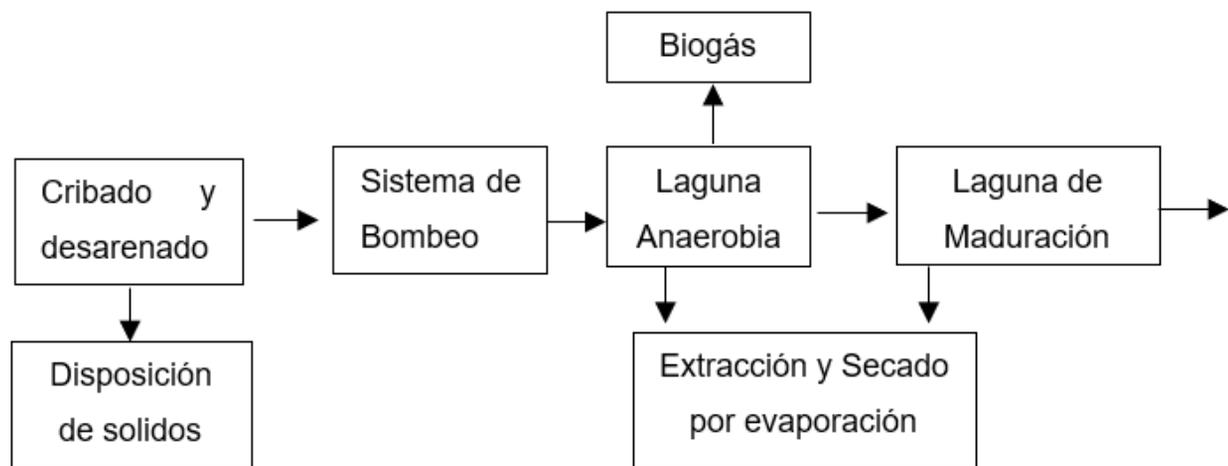


Figura 55: Tren tratamiento PTAR Alternativa 3.

#### 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:

#### **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)	2.5

Tabla 18 continúa de la página anterior

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	9.0
Volumen Floculador sedimentador ( $m^3$ )	3.0	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)	1.59	0.59	0.59
Costo promedio químicos (\$/día)	27,893.3	10,395.0	10,395.0
Área Reactor ( $m^2$ )	3.0	1.0	2.0
Potencia de equipos requeridos (KW)	2.7	2.6	7.6
Valor KW/hora	500.0	500.0	500.0
Consumo energético \$/día	29,150.0	28,050.0	83,050.0
Costos operativos \$/día	57,043.3	38,445.0	93,445.0
Costos de construcción <sup>1</sup>	2.0	1.0	3.0

Tabla 19: Cálculos alternativas PTAR

Parámetro	Alternativas
Cálculos	

<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

Q Diseño (l/s)	2.0		
DBO <sub>in</sub> (ppm)	220.0		
DQO <sub>in</sub> (ppm)	500.0		
SST <sub>in</sub> (ppm)	220.0		
Kg DBO/día	38		
Kg DQO/día	86		
Kg SST/día	38		
Alternativas	Lodos Activa- dos	UASB+FAFA	Lagunas
TRH h	13.2	7.0	120.0
Volumen Total Reacción (m <sup>3</sup> )	95	50.4	864
Profundidad reactor (m)	3.0	6.0	1.0
Área Reactor (m <sup>2</sup> )	31.7	8.4	864
Eficiencia de Remoción DQO	64 %	64 %	64 %
Eficiencia de Remoción DBO	59 %	59 %	59 %
Lodos producidos tra- tamiento secundario Kg SS/día	10	6.8	15
Potencia de equipos requere- dos (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 (\$)	80,784,000.0	42,840,000.0	302,400,000.0
Eficiencia Teórica RAS2000	95 %	90 %	90 %
Concentración DBO salida Teórica PTAR (ppm)	11.0	22.0	22.0

### 4.5.3. Análisis de Información existente

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

<b>Parámetro</b>	<b>Fuerte</b>	<b>Media</b>	<b>Débil</b>
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

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 56) 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	6.0 – 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	Sí, 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 56: Calidad de la fuente.

#### 4.5.4. 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	eva-	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
Flexibilidad de la operación.	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.	4	5	2

Confiabilidad del proceso.	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.	4	3	5
Complejidad de operación del proceso	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.	4	5	3
Requerimiento de personal	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.	4	5	3
Requerimientos de análisis y controles	La alternativa 1 presenta mayor cantidad de controles debido a que cuenta con mayor numero 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 refleja 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 sistemas pueden contar con un diseño arquitectónico agradable e integrado al entorno, sin embargo la planta con mas unidades a la vista tiene un impacto mayor.	2	3	3
Producción de malos olores.	Los olores generados por los 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

#### 4.5.5. 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. + CLA- RIF.	UASB + FAFA + CLA- RIF.	SIST. LAGU- NAR
Factor eva- luado	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

<p>Complejidad de construcción y equipamiento.</p>	<p>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.</p>	<p>3</p>	<p>4</p>	<p>2</p>
<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 el sistema lagunar por el área requerida pocas veces tiene dualidad en las unidades.</p>	<p>5</p>	<p>4</p>	<p>2</p>
<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>

Requerimiento de personal	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.	2	4	4
Requerimientos análisis y controles	El control de las operaciones rutinarias es más complejo para el sistema de lodos activados, que para el UASB y las lagunas	2	3	5
Disponibilidad de repuestos y centros de servicio	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.	2	3	5
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 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		ALTERNATIVA 2		ALTERNATIVA 3												
			COAGULACION, FLOCULACION, SEDIMENTACION, FILTRACION, DESINFECCION		FILTRACION, DESINFECCION		TANQUE DE AGUA CRUDA + MICRO + ULTRA FILTRACION, DESINFECCION												
			CALIFICACION 0= no aplica 1= deficiente 2= regular 3= adecuado 4= bueno 5= muy bueno	D/5 (excepto en renglones 9.4, 10.8 y 11.6)	E*B	CALIFICACION 0= no aplica 1= deficiente 2= regular 3= adecuado 4= bueno 5= muy bueno	D/5 (excepto en renglones 9.4, 10.8 y 11.6)	E*B	CALIFICACION 0= no aplica 1= deficiente 2= regular 3= adecuado 4= bueno 5= muy bueno	D/5 (excepto en renglones 9.4, 10.8 y 11.6)	E*B								
		PROCESO EVALUADO: PTAP																	
1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
8	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
8.1																			
8.3																			
9	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
9.1																			
9.2																			
9.3																			
9.4																			
10	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
10.1																			
10.2																			
10.3																			
10.4																			
10.5																			
10.6																			
10.7																			
10.8																			
11	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
11.1																			
11.2																			
11.3																			
11.4																			
11.5																			
11.6																			
12	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
12E																			

Figura 57: Matriz de decisión PTAP.

4.6.2. Matriz de decisión PTAR

#	% PROCESO EVALUADO: PTAR	TIPO DE TRATAMIENTO		LADOS ACTIVADOS+ CLARIFICACION		UASB+FAFA+ CLARIFICACION		SISTEMA LAGUNAR			
		EFICIENCIAS A GARANTIZAR (%DBO)	EFICIENCIAS A GARANTIZAR (%DQO)	DI/5 (excepto en renglones 9.4, 10.8 y 11.6)	E*B	CALIFICACION	DI/5 (excepto en renglones 9.4, 10.8 y 11.6)	E*B	CALIFICACION	DI/5 (excepto en renglones 9.4, 10.8 y 11.6)	
1	2	APLICABILIDAD DEL PROCESO (Variaciones de Caudal)		4.0	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	0.6	1.8	2.0	0.4	1.2
3	5	GENERACION DE RESIDUOS		3.0	0.6	3.0	1.0	5.0	2.0	0.4	2.0
4	5	ACEPTACION POR PARTE DE LA COMUNIDAD		5.0	1.0	5.0	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	0.6	9.0	2.0	0.4	6
6	5	VIDA UTIL		2.0	0.4	2.0	0.8	4.0	5.0	1.0	5
7	10	REQUERIMIENTO DE AREA		1.0	0.2	2.0	1.0	10.0	1.0	0.2	2.0
8	10	COSTO									
8.1		Inversión		2.7					5.0		
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 CONSTRUCCION									
9.1		Criterios de diseño		4.0					4.0		
9.2		Tecnología ampliamente probada		3.0					4.0		
9.3		Complejidad en la construcción y equipamiento		3.0					4.0		
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	OPERACION									
10.1		Flexibilidad de operación		5.0					4.0		
10.2		Confiablez del proceso		3.0					3.0		
10.3		Complejidad de operación del proceso		2.0					4.0		
10.4		Requerimiento de personal		2.0					4.0		
10.5		Requerimientos análisis y controles		2.0					3.0		
10.6		Disponibilidad de repuestos y centros de servicio		2.0					3.0		
10.7		Sostenibilidad en Operación y mantenimiento		1.0					2.5		
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		
11.2		Producción de ruido		1.0					4.0		
11.3		Contaminación visual		2.0					3.0		
11.4		Producción de malos olores		3.0					2.0		
11.5		Calidad del vertimiento		5.0					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 58: 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 Espacio Territorial de Capacitación y Reincorporación, 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 **2,5 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 1965,0 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 **2,5 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 22,5 m de la bocatoma, sobre la cota 1964,0 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 2,5 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 g/cm<sup>3</sup> (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 90mm como diámetro adecuado para la conducción del sistema de agua cruda, la cual tiene una longitud total de 1946,04 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, 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 **1090 hab** para el año 2046, y el caudal de diseño del sistema de tratamiento el cual corresponde a **2,5 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): un (1) módulos
- Filtración rápida descendente: dos (2) 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 60), 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 59.



Figura 59: Esquema 3D de la PTAP.

### 6.1. Diagrama de flujo de procesos

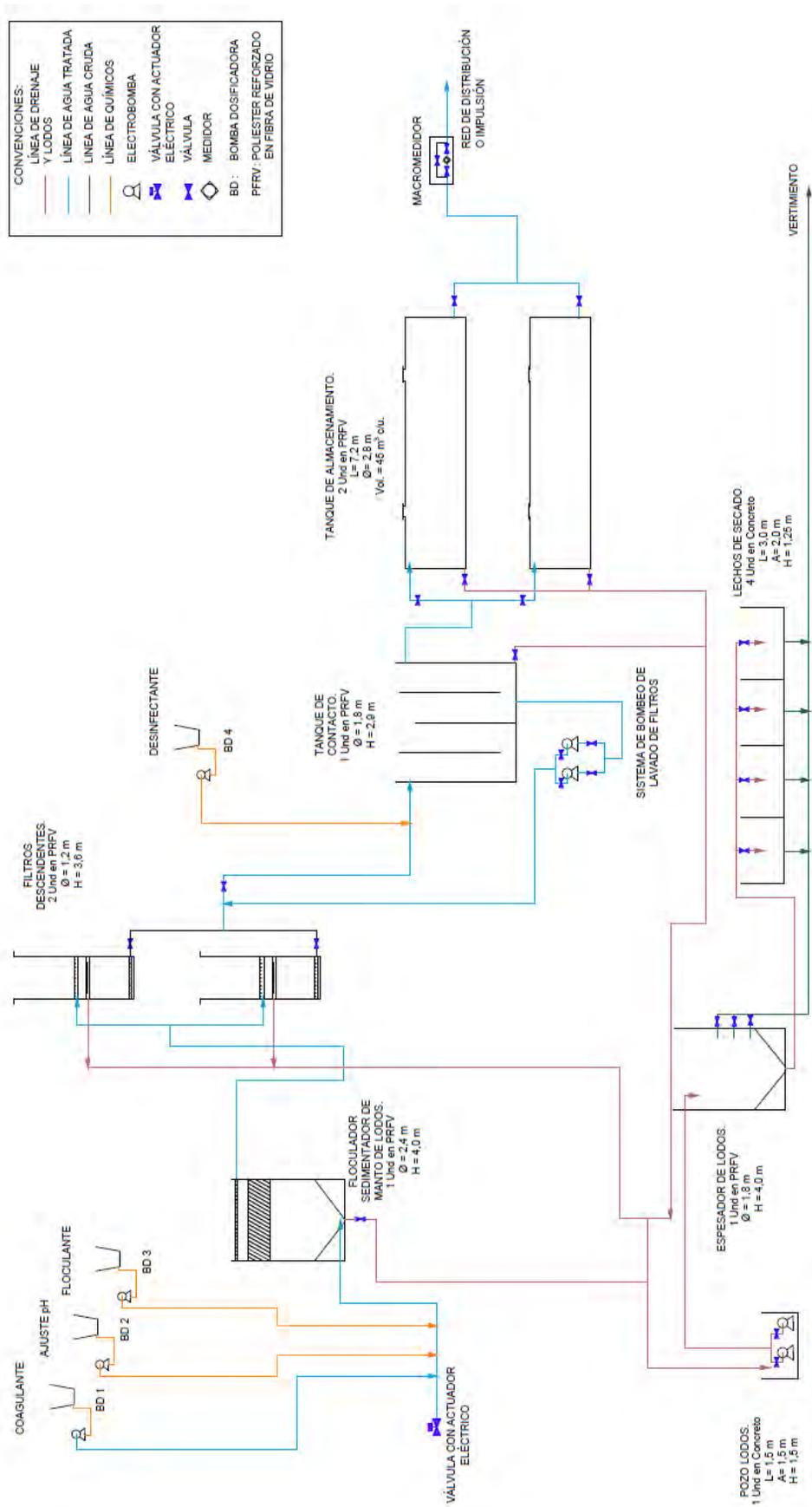


Figura 60: Diagrama de flujo de procesos en la PTAP.

## 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:

$$Vol_{coag} = \frac{C \cdot V}{100 \cdot \rho_w} \tag{6.1}$$

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:

$$P_1 = \frac{D \cdot Q}{1000} \tag{6.2}$$

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,

$$q = \frac{P_1 \cdot 100}{C} \tag{6.3}$$

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)
1,27	0,002	0,46
2,53	0,003	0,92

### 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)
1,27	7,60
2,53	15,19

### 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 61).

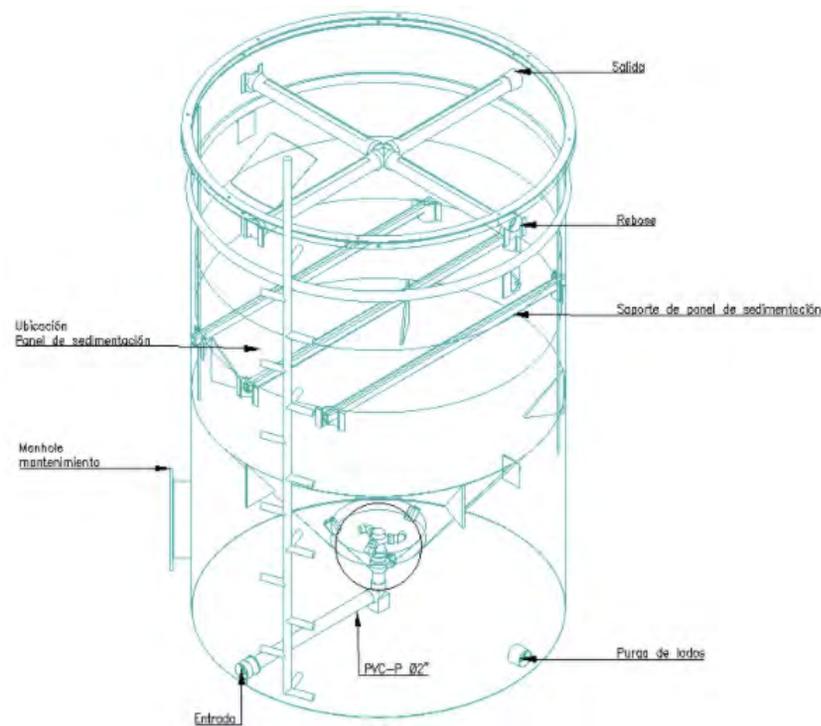


Figura 61: Esquema Floculador Sedimentador de Manto de Lodos (FSML).

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  $0,53 \text{ m}^3$ , 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 0,50 m es la altura de floculación, 0,6 m la zona de sedimentación acelerada, 1,04 m la altura de la tolva de lodos, 0,60 m la altura entre paneles y canaleta, 0,20 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)	1,04	m
Volumen de la tolva cónica de lodos (VC)	1,60	$m^3$
Altura zona sedimentación acelerada	0,60	m
Altura entre paneles y canaleta	0,60	m
Altura Total Canaleta (ht)	0,20	m
Borde libre floculador (BL)	0,30	m
Altura floculacion (Alt floc)	0,50	m
Altura útil floculador (Alt floc)	2,00	m
Altura total floculador (Alt floc)	4,00	m
Volumen del cilindro (VCI)	9,0	$m^3$
Volumen total del floculador (VT)	10,6	$m^3$
Tiempo de detención hidráulico (TDH)	1,2	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 propone un módulo para Floculador-Sedimentador de Manto de Lodos (FSML), para un caudal total de 2,5 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 62) 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.

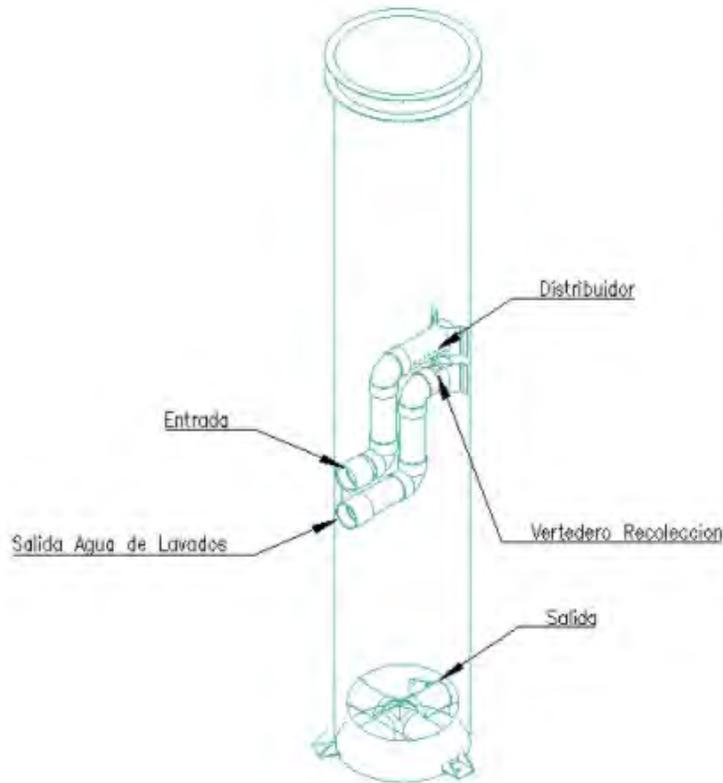


Figura 62: Esquema del filtro en arena.

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 tasa 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 2 filtros con lecho de arena de operación descendente, cada uno funcionará a caudal de 1,25 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 12,0 l/s, para un tiempo de lavado de cada uno de 5 min, lo que genera un volumen de agua de lavado de  $3,60 \text{ m}^3$  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 ( $\emptyset f$ )	1,2	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	0,39	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  $95,5 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$  para una velocidad de infiltración de  $0,11 \text{ cm/s}$ . 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  $2,5 \text{ l/s}$ , 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	2,5	l/s
Volumen del tanque de contacto	6,0	$m^3$
Borde libre	0,3	m
Altura útil del tanque de contacto	2,60	m
Área requerida para el tanque	2,31	$m^2$
Diámetro del tanque	1,71	m
Diámetro adoptado	1,80	m
Altura total del tanque de contacto	2,90	m

El tanque de contacto se propone de cuatro (4) cavidades (Figura 63) 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 63: 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 83  $m^3$  al día, para garantizar dicho almacenamiento se establece dos (2) tanques de almacenamiento de 41,78  $m^3$  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 64.

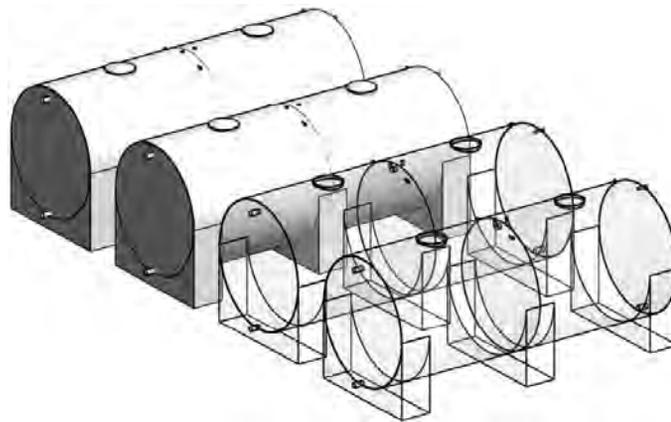


Figura 64: Esquema Tanques de almacenamiento.

Tabla 29: Dimensiones del tanque de almacenamiento.

Parámetros/ Datos	Valor	Unidad
Número de tanques (N)	2	un
Volumen requerido del tanque	41,5	$m^3$
Largo asumido del tanque	7,20	m
Borde libre (BL)	0,30	m
Lámina de agua en el tanque	2,50	m
Radio adoptado del tanque	1,40	m
Área útil del tanque	5,80	$m^2$
Volumen útil del tanque	41,78	$m^3$
Volumen total del tanque	44,33	$m^3$

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 (ver 30).

$$q_e = C_d \cdot a \cdot \sqrt{2gh} \quad (6.4)$$

Tabla 30: Tiempo de vaciado del tanque.

Parámetros/ Datos	Valor	Unidad
Coefficiente de descarga (Cd)	0,6	
Diámetro del orificio ( $\emptyset_o$ )	4,00	pulg
Área del orificio (a)	0,008	$m^2$
Gravedad (g)	9,81	$m/s^2$
Carga hidráulica sobre el orificio (ho)	2,50	m
Caudal descargado ( $Q_e$ )	0,034	$m^3/s$
Caudal descargado ( $Q_e$ )	34,1	l/s
Duración de la descarga (t)	211,34	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 65), 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.

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  $7,73 \text{ m}^3/d$ . 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 conte-

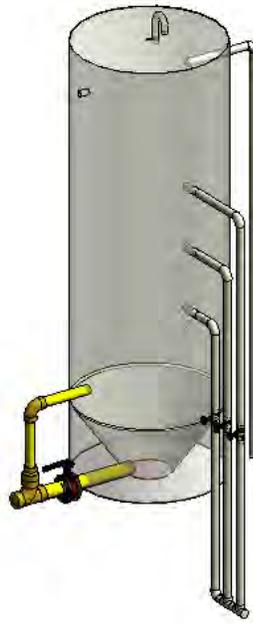


Figura 65: Esquema del espesador hidráulico.

nido de agua en el lodo a menos de un **10 %** y con concentración de sólidos mayores al **25 %**, un modelo de Lechos de Secado se aprecia en la Figura 66. 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**.

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 67.

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

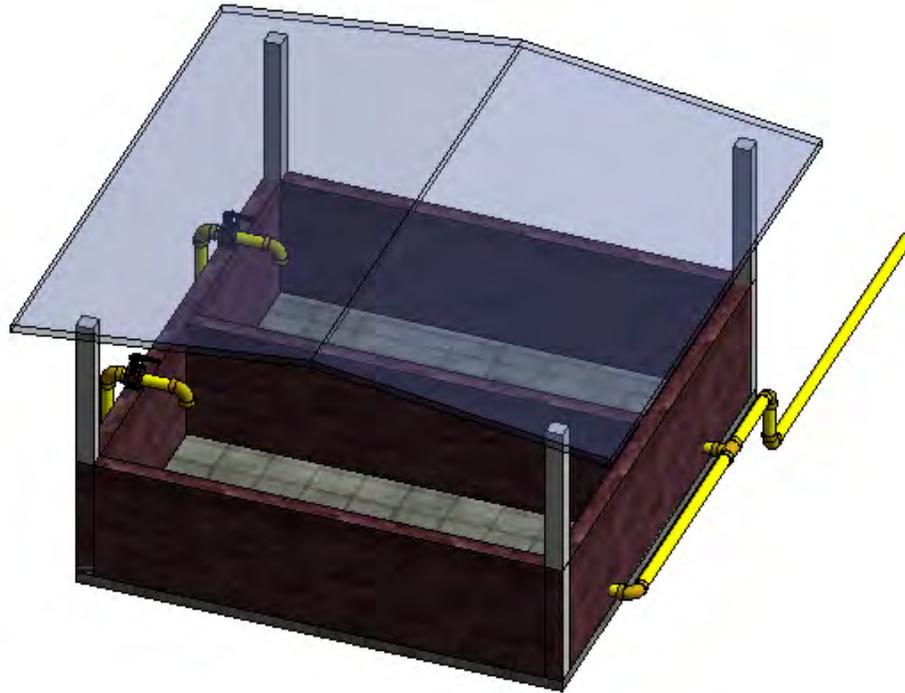


Figura 66: Esquema de los lechos de secado.

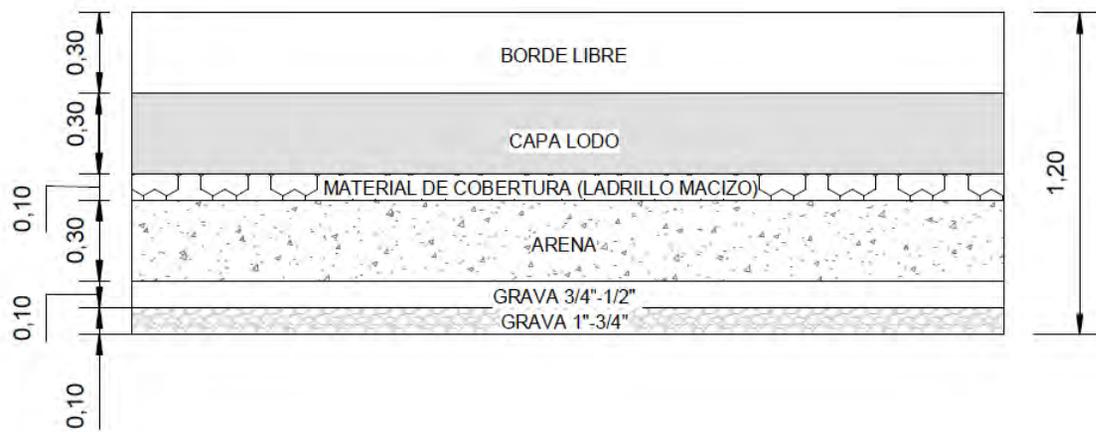


Figura 67: Estratificación de la estructura del lecho de secado (medidas en metros).

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 68).

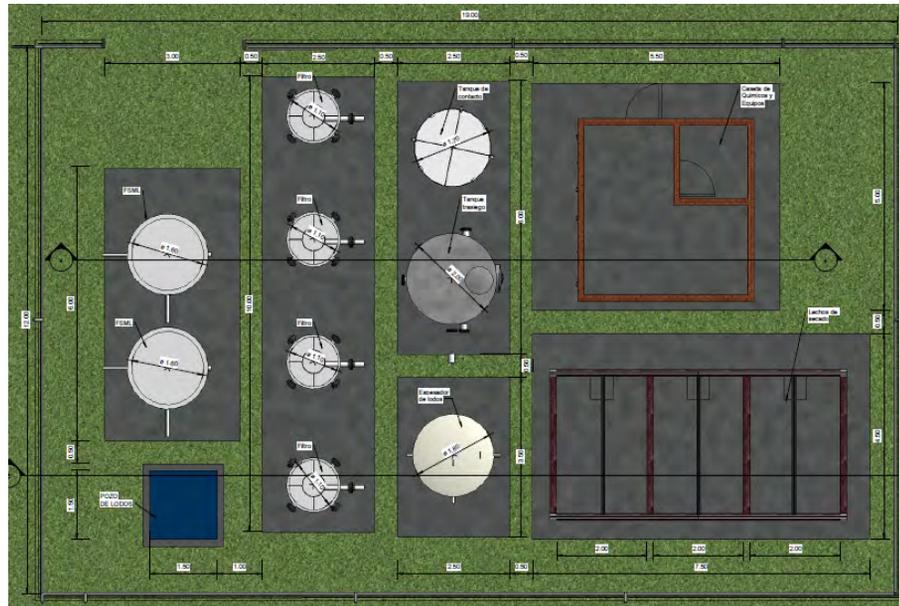


Figura 68: Vista en planta de la distribución propuesta en la PTAP.

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 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:

- 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, 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 1090 hab para el año 2046, los cuales generan un caudal de diseño del sistema de tratamiento de 2,0 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 70), en la Figura 69 se puede observar un modelo en 3D del sistema.

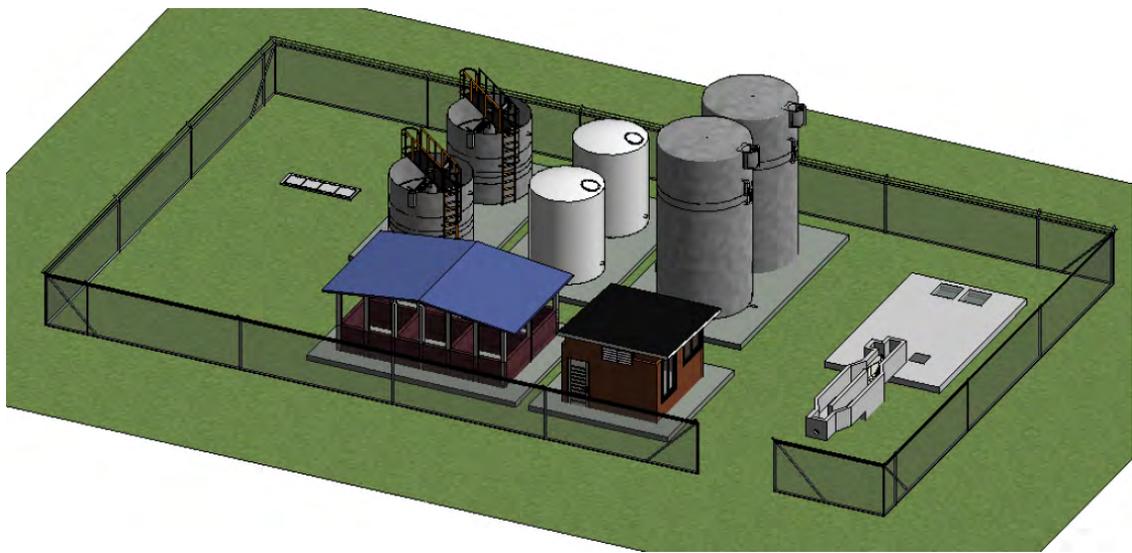


Figura 69: Esquema 3D de la PTAR.

### 7.1. Diagrama de flujo de procesos

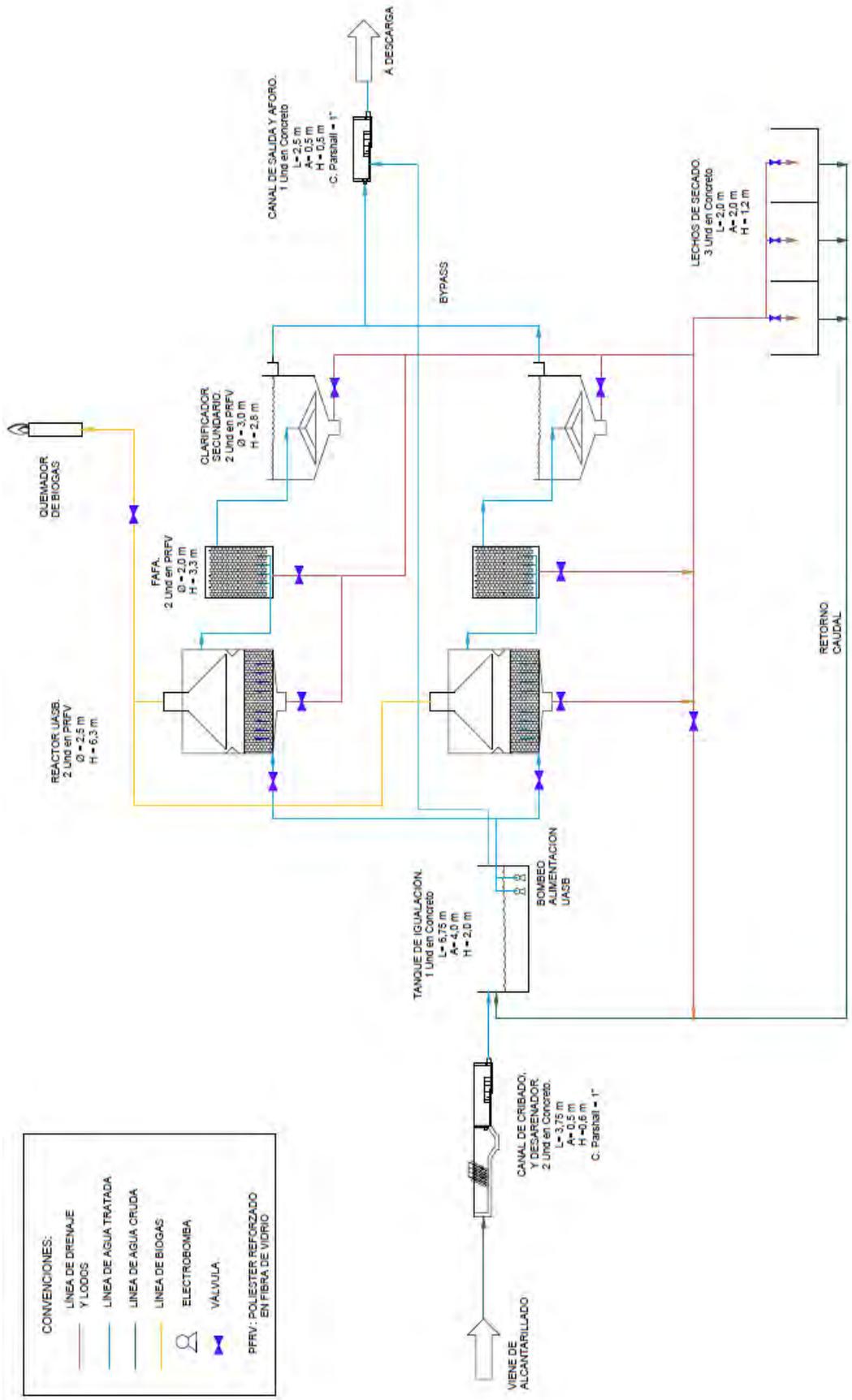


Figura 70: Diagrama de flujo de procesos en la PTAR.

## 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 **2,0 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.

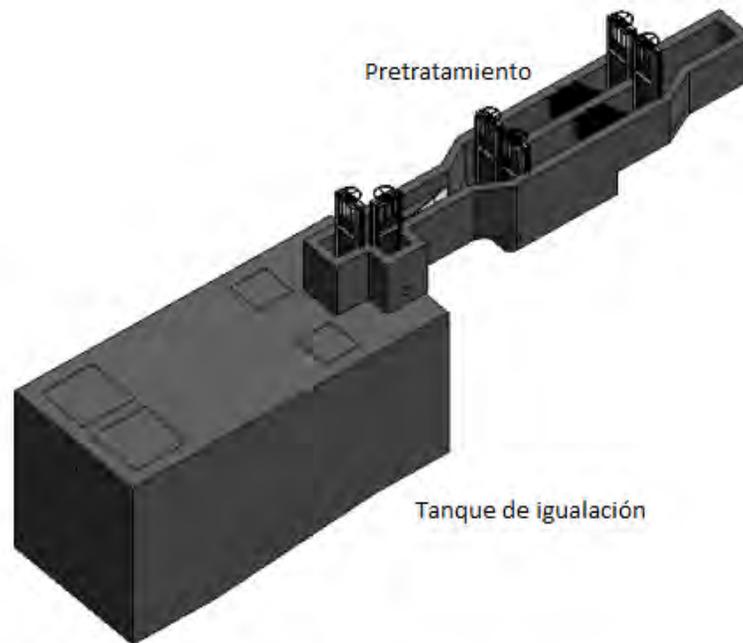


Figura 71: Canal de entrada y pretratamiento de las aguas residuales.

Como se aprecia en la Figura 71 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 tratamiento 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 **2,0 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 71 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 produce 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 72.

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.

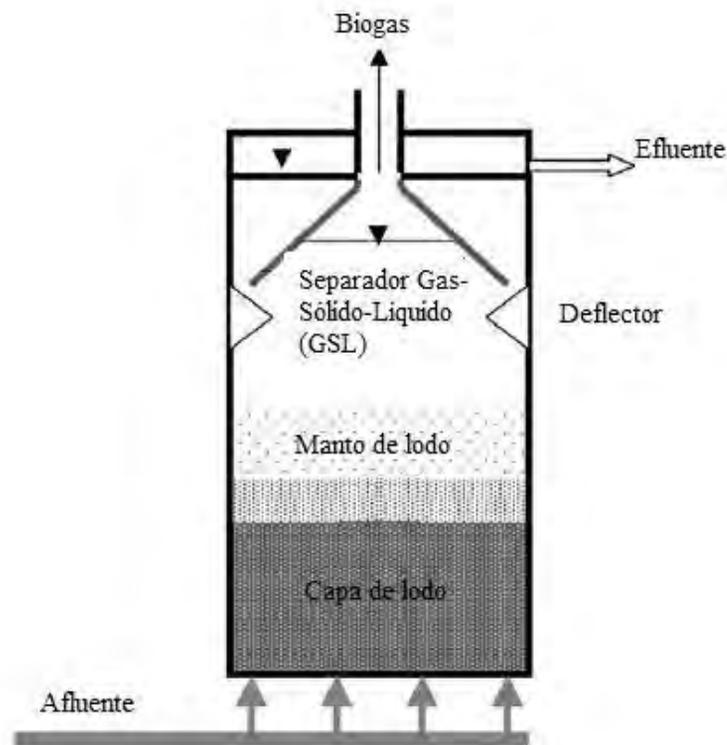


Figura 72: Esquema del reactor UASB.

Se realiza así el diseño de dos estructuras de tratamiento biológico anaerobio tipo UASB, estructuras de geometría circular de diámetro de **2,50 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 **2,0 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  $30,93 \text{ m}^3$  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 73), 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  $90 \text{ m}^2/\text{m}^3$  y una profundidad total de capa de filtro de **2,8 m**.

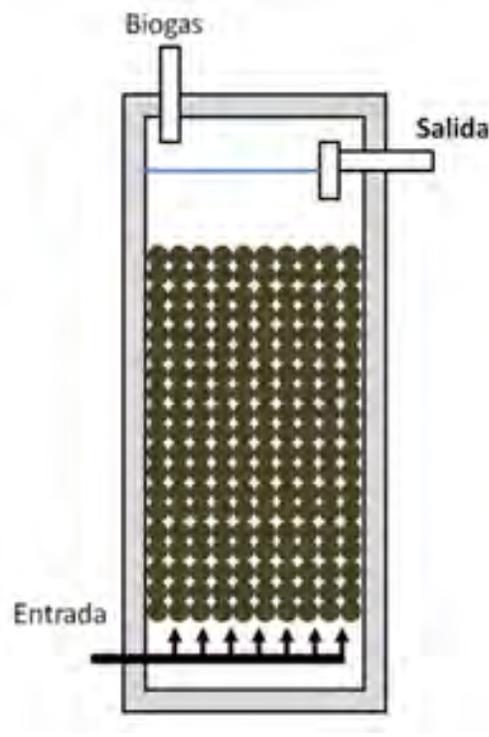


Figura 73: Esquema del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA).

El reactor FAFA se diseña para una tasa de carga orgánica volumétrica asumida de  $1,40 \text{ kg DQO}/\text{m}^3 \cdot \text{día}$  con la cual se calcula un volumen total de FAFA de  $8,97 \text{ m}^3$ . 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 **2,0 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.

### 7.2.5. Sedimentador secundario de alta tasa

Se diseña para la remoción de los sólidos que por arrastre se escapen 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 74).

Los sedimentadores, dos unidades en PRFV se diseñan para una caudal proveniente de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA) de **2,0 l/s**, en ellos se realiza entonces la decantación de los sólidos suspendidos en el agua.

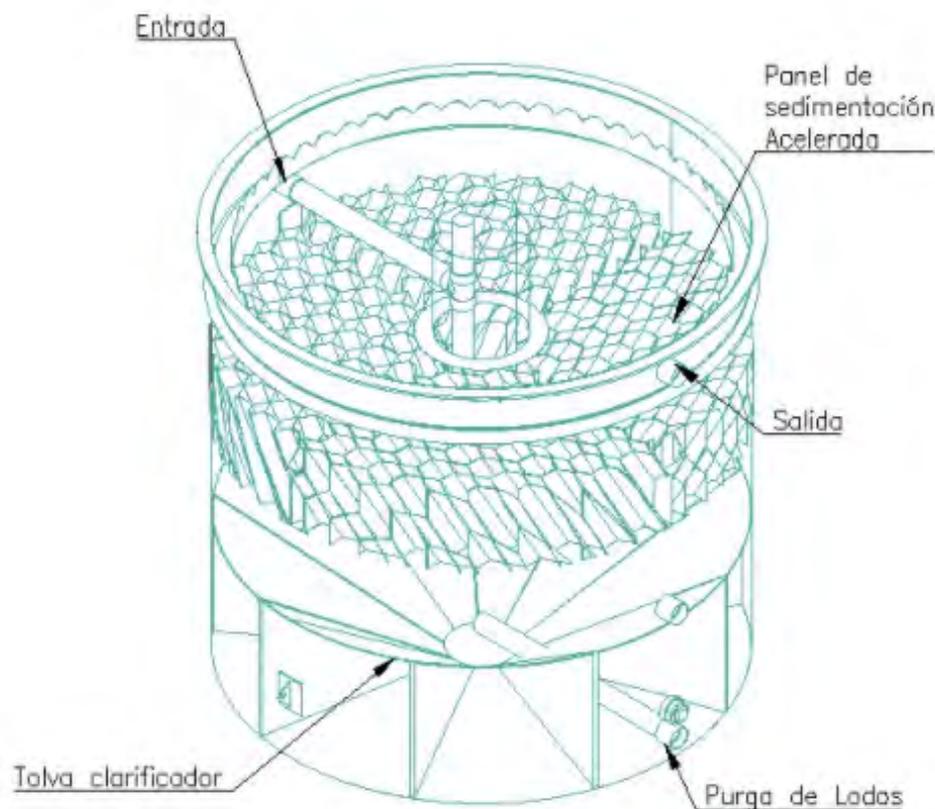


Figura 74: Modelo del Sedimentador Secundario con paneles de tasa alta.

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**.

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  $0,073 m^3$  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 efluente 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 (2,0 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 (2,0 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  $0,073m^3/día$ , 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 **1,5 m** y largo **2,0 m**, un esquema de estos se presenta en la Figura 75.

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

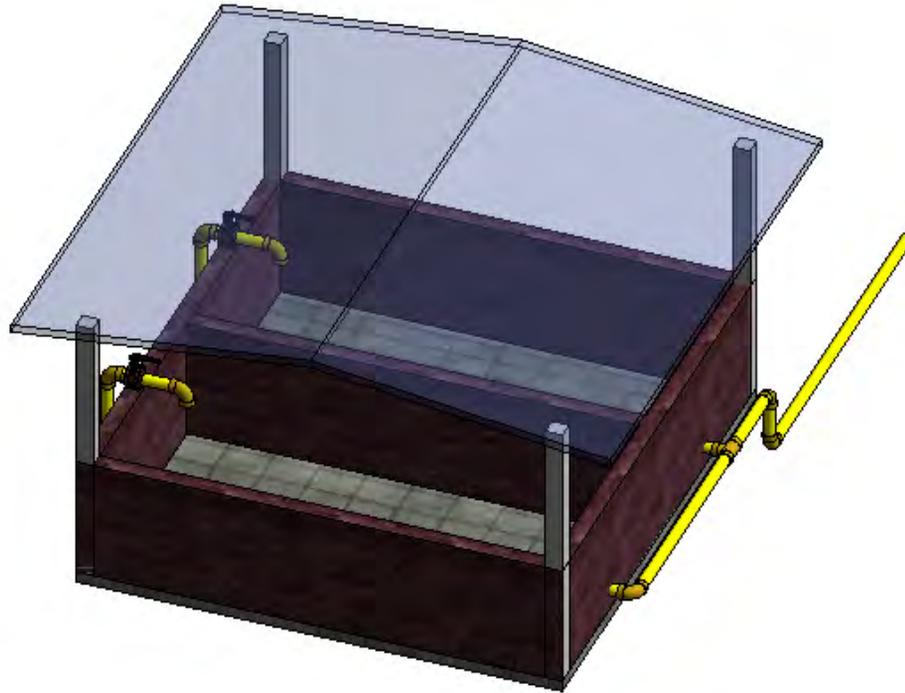


Figura 75: Esquema de los lechos de secado.

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 76.

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, contruidos en concreto reforzado, provistos de protección de la lluvia y con techo translúcido para aprovechar la radiación solar en el secado.

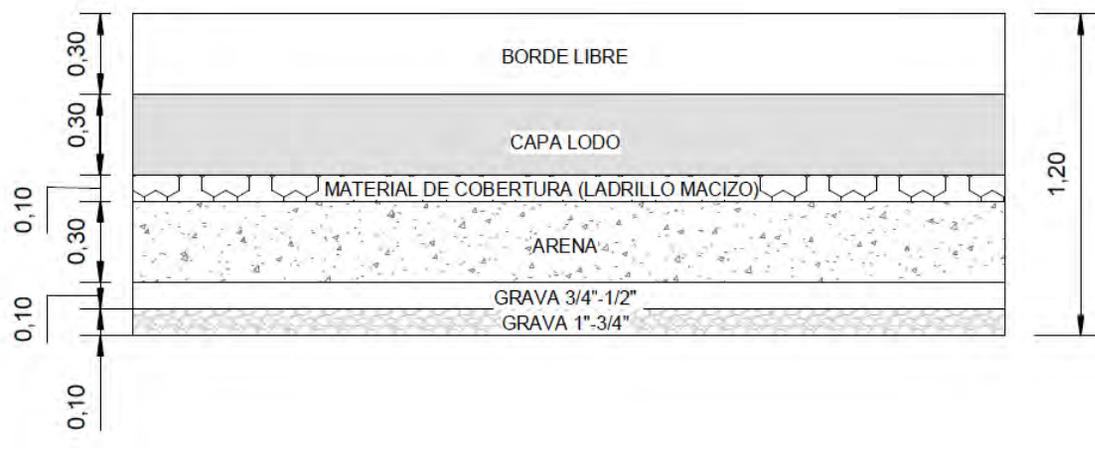


Figura 76: Estratificación de la estructura del lecho de secado (medidas en metros).

### 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 8,1 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.

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.

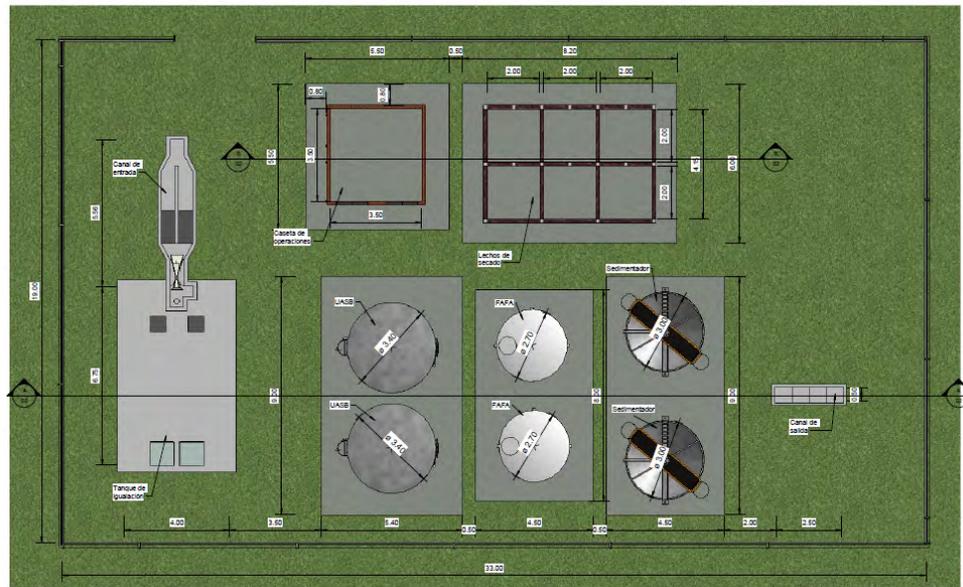


Figura 77: Vista en planta de la distribución propuesta en la PTAR.

#### 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 antiguo 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 78 con las posibles zona de reubicación en caso que así se requiera.

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.

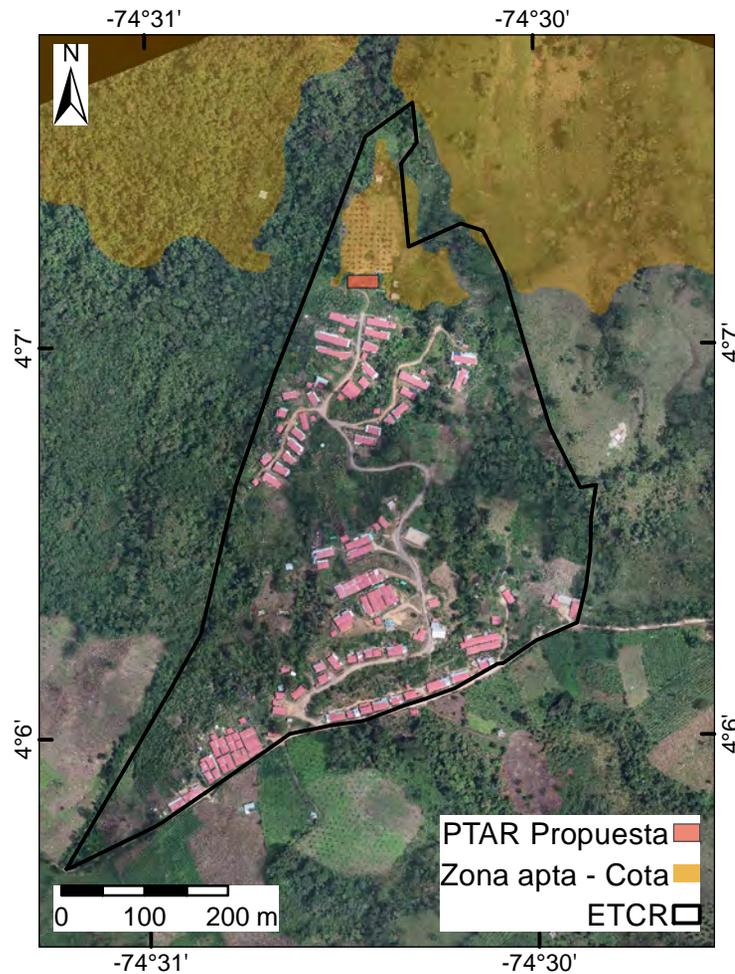


Figura 78: Alternativas de ubicación adicional para PTAR

- 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.

# 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.

- **Mapa de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa plancha 265 (SGC, 2015):** Mapa realizado por el Servicio Geológico Colombiano a escala 1:100.000 la metodología para la elaboración de este mapa es heurística, se observa en la Figura 79a que las zonas de amenaza media se presenta en gran parte de toda la cuenca incluyendo la zona del predio del antiguo ETCR, solo algunas zonas al oeste de la cuenca están clasificadas como amenaza alta.
- **Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa elaborado en el esquema ordenamiento de territorial para el municipio de Icononzo, (Municipio de Icononzo, 2007):** Mapa realizado en el EOT para el municipio de Icononzo año 2007, la escala del mapa es 1:25.000, se observa en la Figura 80 que en el mapa solo algunas zonas tienen clasificación de susceptibilidad alta y media, en el extremo este del mapa una franja clasificada como amenaza alta que concuerda con la clasificación del mapa de susceptibilidad del SGC, la zona del predio del antiguo ETCR no tiene ninguna clasificación en este mapa.

## 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 espacio

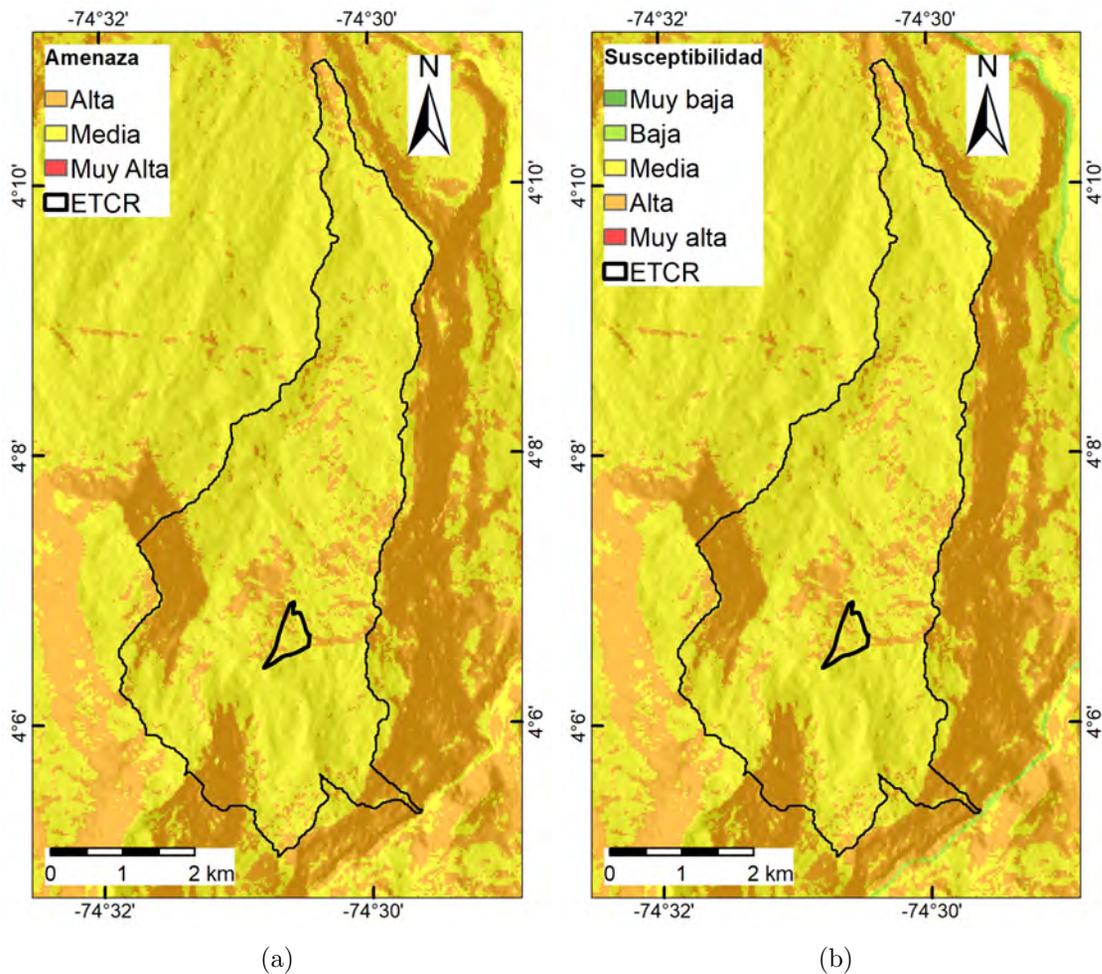


Figura 79: a) Mapa de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC. b) Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC.

territorial La Fila. 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 81 presenta el área de influencia por movimientos en masa para el antiguo espacio territorial La Fila.

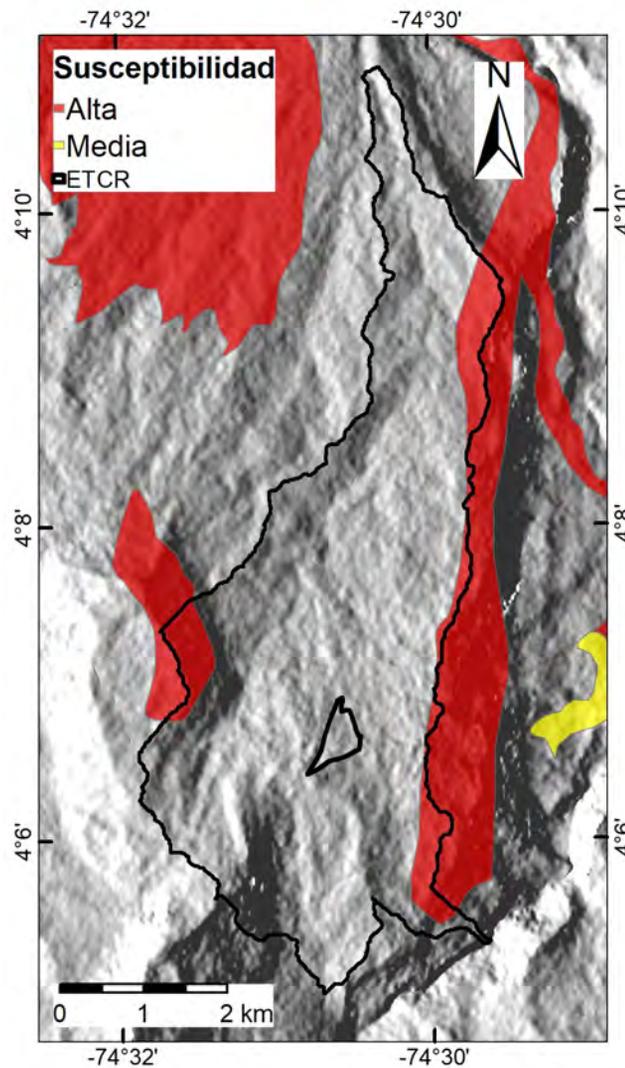


Figura 80: Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa EOT Icononzo, 2007

#### 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. Catalogo 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 Icononzo en las plataformas del Sistema de Inventario de Desastres (DesInventar) y el Sistema de Información de Movimientos en Masa

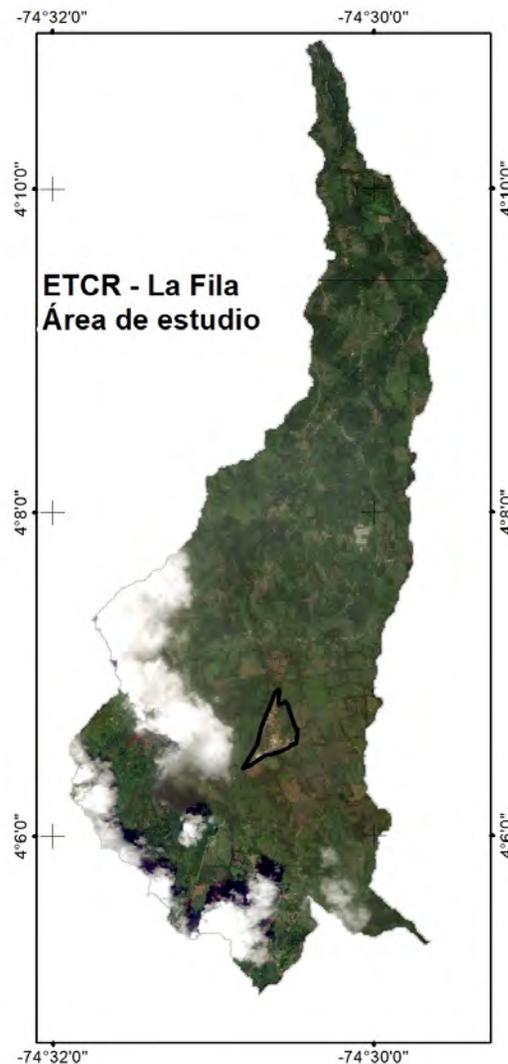


Figura 81: Localización del área de estudio del antiguo ETCR La Fila

(SIMMA), con el fin de dar una mirada en la morfodinámica regional asociada al antiguo ETCR La Fila. 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 1976 y el primer trimestre del año 2013, el municipio de Icononzo registró en el catálogo del DesInventar 5 eventos clasificados como movimientos en masa, los cuales representan el 29,4 % de los reportes (teniendo en cuenta solo eventos tipo movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales) dejando como saldo 55 personas afectadas. Dentro de los 5 reportes se encontró el que se registró en el año 1995 un evento de remoción en masa tipo deslizamiento en la vereda de El Silencio por la margen izquierda del Río Sumapaz cercano al municipio de Venecia Cundinamarca. El factor detonante del movimiento fue el agua, la cual al infiltrarse a través del material superficial altamente permeable y poroso generó el evento (INGEO-MINAS, 1995).

Así mismo en el catálogo del SIMMA se registran 10 eventos de movimientos en masa durante el periodo comprendido entre 1997 y el primer trimestre del año 2012. La Figura 82 representa la distribución espacial de los registros en este último catálogo. Uno de los registros se localiza en la cuenca de la Q. Mogollas del área de influencia del antiguo ETCR La Fila.

#### **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 1:25000 (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

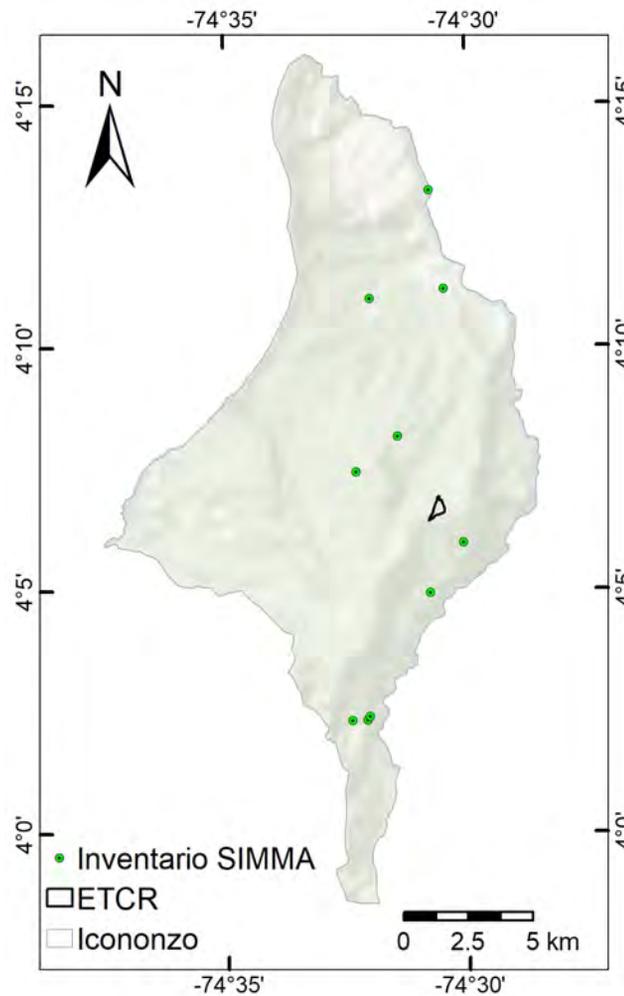


Figura 82: Distribución espacial de movimientos en masa en el municipio de Icononzo registrados en el catálogo SIMMA

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  $12,5m \times 12,5$  de la plataforma *ALOS PALSAR*, la capa raster con información de las pendientes y las imágenes satelitales de proveedores como *Google* (imágenes del año 2015) 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 morfo-dinámicos presentes en el área de estudio. Se identifican movimientos en masa clasificándolos en activos e inactivos, se identifican zonas con erosión y zonas con depósitos de vertiente, depósitos aluviales y aluvioterrenciales (Figura 83) considerados como sedimentos disponibles y que pueden complementar el mapa

de unidades geológicas superficiales para la zona.

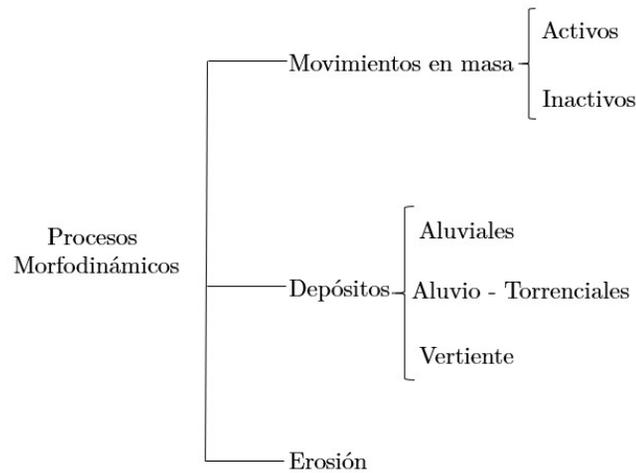


Figura 83: Clasificación utilizada en la identificación de procesos morfodinámicos

En la Figura 84 se presentan los elementos asociados a los procesos morfodinámicos que se capturan durante el proceso del fotoanálisis.

En el área se identifican 66 movimientos en masa, 55 activos (83,3 %) y 11 inactivos (16,7 %) (Tabla 32). Los movimientos en masa activos se concentran hacia el SW de la zona, en la parte alta de la quebrada La Laja, aguas abajo sobre el costado izquierdo. En relación a los depósitos identificados, los depósitos de vertiente son los más representativos con un 55,8 % del total en términos de área, seguido por los de tipo aluvio- torrencial (29,8 %) y finalizando con los aluviales (14,4 %) (Tabla 32). Debido a la presencia de nubes, no fué posible realizar el fotoanálisis en algunas zonas del área de estudio.

Tabla 32: Procesos morfodinámicos La Fila - Zona D

Proceso	Tipo	%
Movimientos en masa	Activo	83,3
	Inactivo	16,7
Depósitos	Aluvial	14,4
	Aluvio-Torrenciales	29,8
	Vertiente	55,8

### 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.

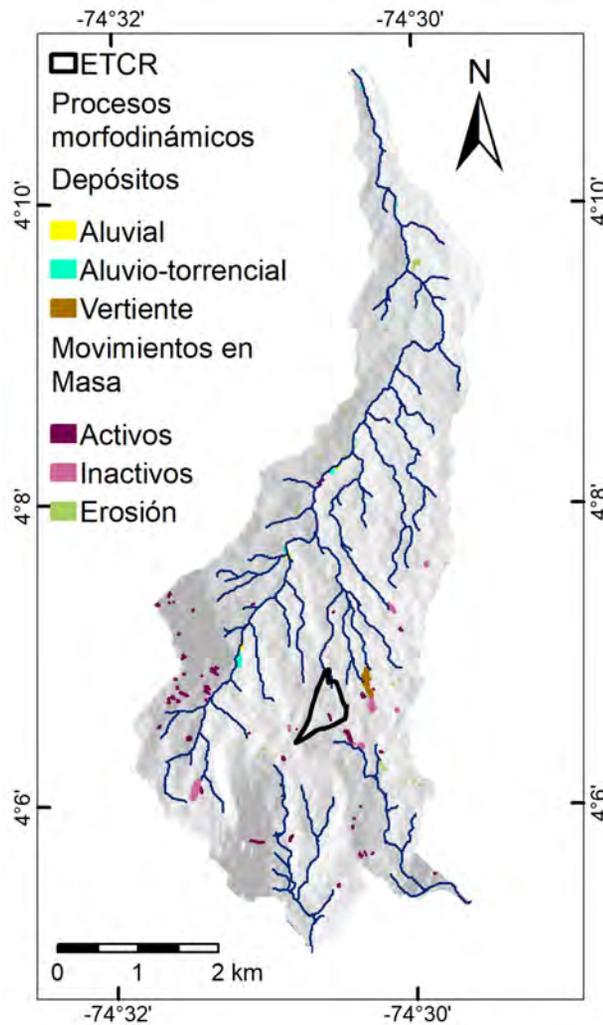


Figura 84: Inventario procesos morfodinámicos La Fila

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).

Considerando el inventario de movimientos en masa, se utiliza en el presente estudio métodos estadísticos para la evaluación de las susceptibilidad por movimientos en masa. Existe una amplia cantidad de modelos, los cuales se clasifican en métodos bivarados y métodos multivariados. Para el presente estudio se seleccionaron tres métodos estadísticos a implementar, de tal forma que permitiera seleccionar el método con el mejor desempeño.

De esta forma, se propone combinar dos métodos heurísticos, Análisis Jerárquico de Procesos (*AHP*) (Saaty, 1980) para asignar peso a las variables, y asigna-

ción directa por criterio de experto para asignar peso a las clases que conforman las variables.

El método AHP corresponde a un método heurístico de toma de decisiones multicriterio, que permite convertir las evaluaciones subjetivas dada por expertos sobre la relativa importancia de las variables condicionantes en la ocurrencia de los movimientos en masa (Ayalew y Yamagishi, 2004). Para evaluar el peso de las variables 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 33. 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.

Tabla 33: Escala de importancia relativa. modificada de

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

Con los pesos respectivos de las variables condicionantes ( $V_n$ ), obtenidos mediante el método AHP, y los pesos de cada clase ( $C_n$ ), se estima la susceptibilidad ( $IS$ ) para cada celda que compone la zona de estudio, utilizando la siguiente ecuación:

$$IS = Vc_1 + Vc_2 + Vc_3 + Vc_4 + \dots + V_n c_n \tag{8.1}$$

### 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. Inclinación 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:

$$Wi = Ln \frac{As}{\tan(slope)} \quad (8.2)$$

Donde  $A_s$  es el mapa raster de acumulación de flujo y  $\text{emphSlope}$  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 un análisis de frecuencia de variables. El cual es un método de distribución espacial que evidencia el comportamiento de cada variable considerando las celdas con movimientos en masa y las celdas sin movimientos en masa o estables. Las mejores variables son aquellas que presenten un comportamiento diferente para celdas con y sin movimientos en masa. La Figura 85, presenta los histogramas de las variables utilizadas.

Adicionalmente 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 86 muestra los resultados para el área donde se resaltan las variables DDS, IL y S, quienes muestran relaciones con valores superiores a 0,45, con tonalidades de rojizas a vinotintas, que evidencian una alta correlación y por ello se deba tomar solo una del par comparado.

De acuerdo con los histogramas de frecuencia y la correlación, las variables con mayor capacidad de discriminar entre la ocurrencia y no ocurrencia de movimientos en masa son:

- Geología superficial (Gs)
- Evolución de las cobertura (Ec)
- Curvatura (Cu)

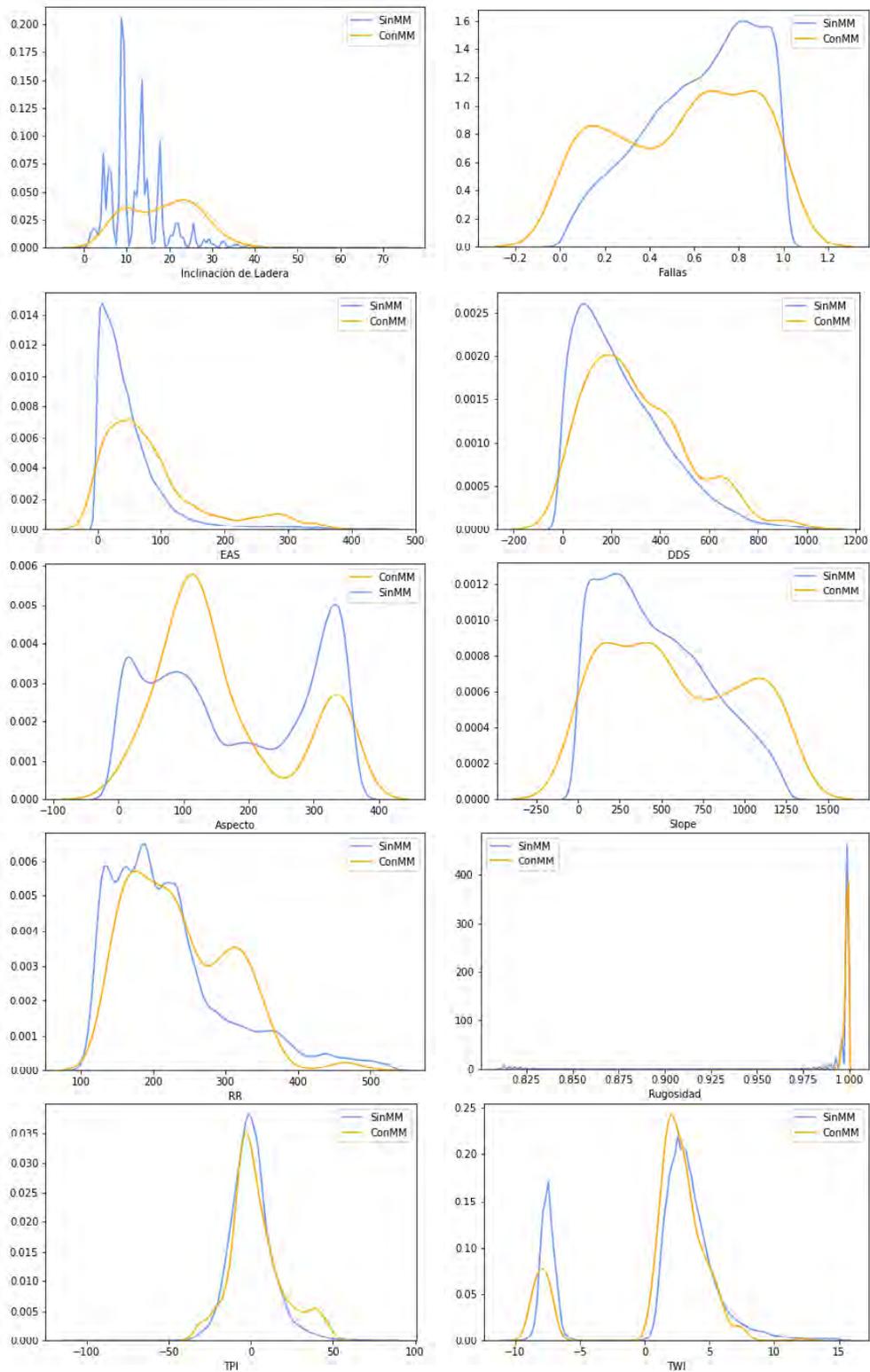


Figura 85: Histograma de frecuencia de Kernel con la densidad de probabilidad para las variables continuas analizadas

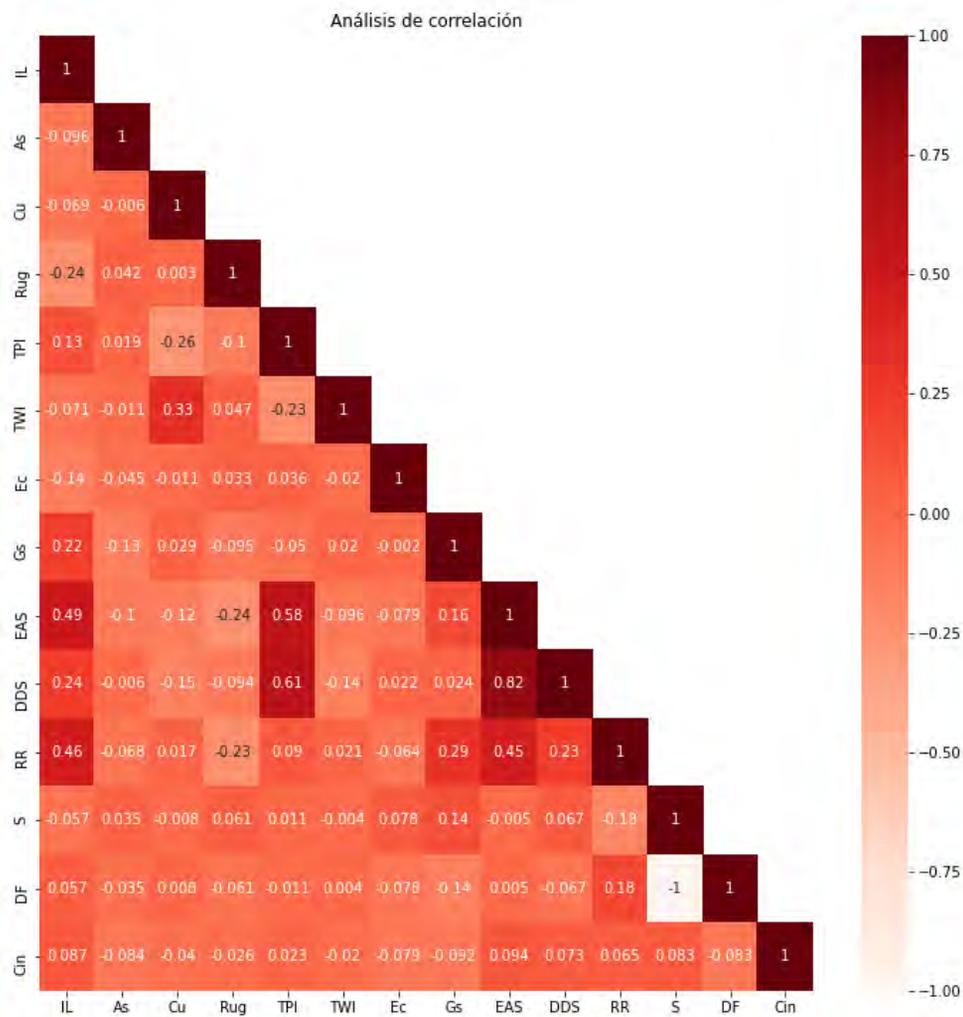


Figura 86: Matriz de correlación

- Pendiente (S)
- Distancia a Fallas (DF)
- Mapa Cinemático (Cin)
- Índice de humedad topográfica (TWI)
- Relieve Relativo (RR)

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 34. 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.

Tabla 34: 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

Para asegurar la consistencia en los valores otorgados por el panel de ingenieros se utiliza el Índice de Consistencia  $IC$ , el cual se estima de la siguiente forma:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{8.3}$$

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, Yamagishi, y Ugawa, 2004)

La Tabla 35 presenta la calificación ponderada realizada para cada variable. La Tabla 36 presenta los pesos finales de cada variable. El índice de consistencia ( $IC$ ) obtenido es de 0,008, lo cual señala una evaluación coherente.

Tabla 35: Matriz de calificación AHP

	<b>S</b>	<b>Cin</b>	<b>Cu</b>	<b>RR</b>	<b>DF</b>	<b>TWI</b>	<b>Ec</b>	<b>Gs</b>
<b>S</b>	<b>1</b>	3	5	5	3	3	1	1
<b>Cin</b>	1/3	<b>1</b>	3	1/3	3	1/5	1/5	1/5
<b>Cu</b>	1/5	1/3	<b>1</b>	1/5	1/3	1	1/5	1/5
<b>RR</b>	1/5	3	5	<b>1</b>	3	5	1	1/3
<b>DF</b>	1/3	1/3	3	1/3	<b>1</b>	5	1/3	1/3
<b>TWI</b>	1/3	5	1	1/5	1/5	<b>1</b>	1/3	1/5
<b>Ec</b>	1	5	5	1	3	3	<b>1</b>	1
<b>Gs</b>	1	5	5	3	3	5	1	<b>1</b>

Tabla 36: Pesos de las variables

<b>Mapa</b>	<b>Peso %</b>
Pendiente (S)	21,7
Cinemático (Cin)	6,7
Curvatura (Cu)	3,3
Relieve Relativo (RR)	14,0
Distancia de Fallas (DF)	8,1
Índice de humedad topográfica (TWI)	6,5
Evolución de la cobertura (Ec)	18,2
Geología superficial (Gs)	21,5

#### 8.5.4. Descripción de variables y estimación de pesos de las clases

Para el peso de las clases se utilizó el método estadístico bivariado denominado Peso de la Evidencia basado en la teoría de la probabilidad Bayesiana. Está fundamentalmente basado en calcular los pesos de las clases que conforman las variables condicionantes. El peso que sera asignado a cada categoría indica la presencia o ausencia en la ocurrencia por movimientos en masa.

Los pesos asignados a cada clase pueden ser pesos positivos ( $W+$ ) y negativos ( $W-$ ). Los pesos positivos ( $W+$ ) indican la presencia de la clase como parámetro que favorece los movimientos en masa y su magnitud indica su correlación. El peso negativo ( $W-$ ) indica la ausencia de la clase. En caso de ser cero, indica que no es de interés para el fenómeno por movimiento en masa (Colombiano-SGC, 2017). La ecuación esta definida por:

$$W+ = Ln \frac{\frac{A1}{A1+A2}}{\frac{A3}{A3+A4}} \qquad W- = Ln \frac{\frac{A2}{A1+A2}}{\frac{A4}{A3+A4}} \qquad (8.4)$$

Dónde A1 es el número de pixeles con movimientos en masa en la clase, A2

número de píxeles con movimientos en masa que no están presentes en la misma clase, A3 número de píxeles en la clase que no hay movimientos en masa y A4 es el número de píxeles en la clase donde no hay movimientos en masa y que no está presente en la misma clase (Ozdemir y Altural, 2013)

Para cada variable entonces se estima el peso de Contraste (C) dado por:

$$C = W^+ - W^- \quad (8.5)$$

Donde C refleja el espacio de asociación respecto a la clase en la predicción del movimiento en masa, la cual es cero cuando la clase no afecta, es positivo cuando existe una asociación positiva y negativo cuando existe una asociación negativa la distribución del movimiento en masa (Colombiano-SGC, 2017)

#### 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 bajamente meteorizadas pertenecientes a las unidades pertenecientes a la formación Guadalupe (Ksg), Formación Seca (Kpgs), lodolitas de fúsgasugá (Pglf) y depósitos cuaternarios de vertiente. A continuación se realiza una descripción litológica de las rocas aflorantes en la zona de estudio a partir de las observaciones de campo, una descripción generalizada del perfil de meteorización y de la matriz de los depósitos de vertiente (Figura 87) complementando y ajustando la información tomada de INGEOMINAS (2002):

A continuación se describe cada una de las variables predictoras seleccionadas para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa, y los valores obtenidos para cada clase por el método peso de la Evidencia.

**Formación Guadalupe (Ksg)** INGEOMINAS (2002) Define la unidad como una secuencia de material arenoso con mezcla de liditas, limolitas silíceas y arcillolitas puede encontrarse suelos constituidos en su gran parte por liditas, que son rocas que contienen alto contenido de sílice conformadas en aguas profundas por lodos sílicos, limonitas silíceas y arcillolitas las cuales se encuentran divididas laminarmente por areniscas macizas de grano fino con cemento silíceo, areniscas "Plaeners", conformados por liditas, limolitas silíceas, loditas y areniscas y arenitas gruesas separadas por capas delgadas de arcillolitas. Tierna, constituidas por areniscas de cuarzo de grano fino. El perfil de meteorización de esta unidad se observó durante los recorridos de campo en la zona de estudio en

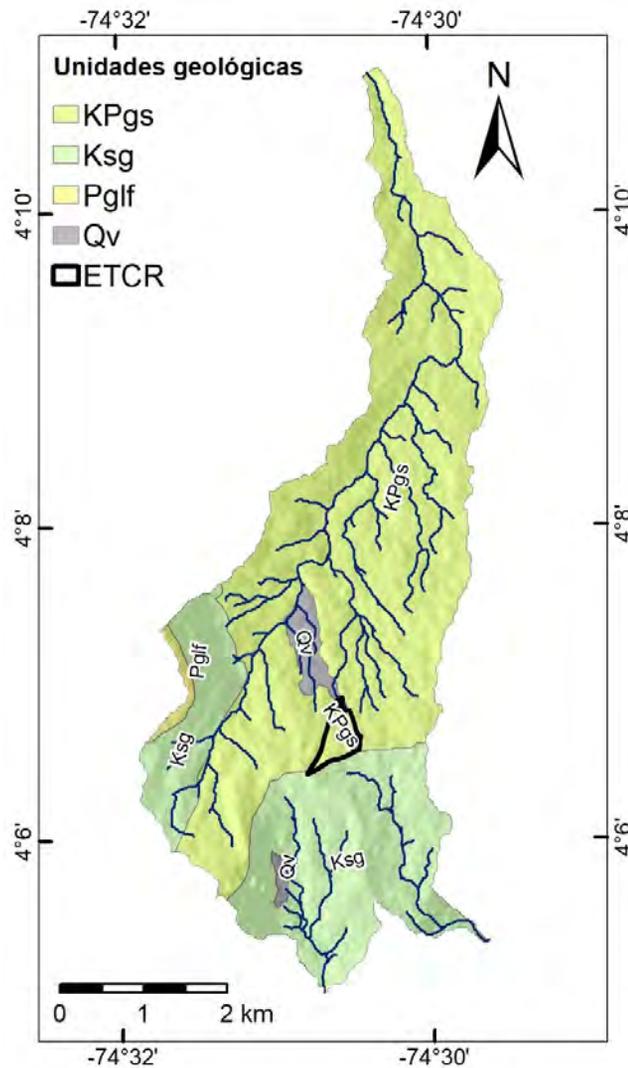


Figura 87: Mapa de Unidades Geológicas Superficiales Predio La Fila

el sector de la vía que conduce del antiguo ETCR Antonio Nariño a la Vereda la Georgina:

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 88).

**Suelo Residual (Ksg-IB).** Se observa una matriz de suelo con textura arcillosa de color naranja con la presencia de lentes de textura arenosa altamente alterados con presencia de Qz con un espesor de 2m de consistencia media y plasticidad media. No se observa estructura alguna de la roca derivada (Figura 88).

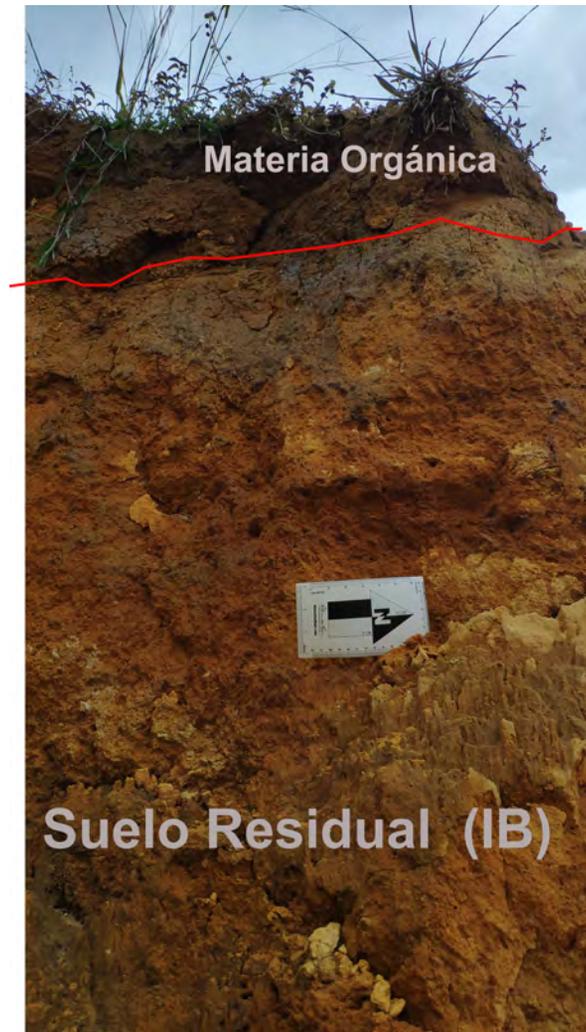


Figura 88: Suelo Residual (IB) de Formación Guadalupe (Ksg)

**Saprolito (Ksg-IC).** En general, se observa estructura de depositación laminar heredada de material de textura arenosa de color blanco con un espesor de 1-5 metros con presencia de granos de Qz y minerales arcillosos y óxidos producto de la alteración de minerales, se observa alta compactación (Figura 89) .

**Roca parcialmente meteorizada (IIB).** Se observa secuencia de arenisca fracturada y meteorizada (Figura 90) moderadamente seleccionada, con tamaño de grano entre 0,5-0,7mm, con granos sub-angulares con alta esfericidad, la roca está compuesta por 80 % de Qz, 20 % de liticos (Figura 91).

**Formación Seca (KPgs).** Las rocas que hacen parte de la Formación Seca



Figura 89: Saprolito (IC) de Formación Guadalupe (Ksg)



Figura 90: Roca Alterada IIB (Parcialmente Meteorizada)



Figura 91: Roca Alterada IIB (Parcialmente Meteorizada)

(KPgs) y su perfil de meteorización cubren la mayor parte de la zona de estudio y se puede evidenciar en los cortes de carretera y en canteras improvisadas donde el suelo residual es usado como insumo de construcción, según INGENIO-MINAS (2002) las rocas correspondientes a esta unidad están conformados por una secuencia de sedimentos compuestos por cuarzoarenitas con capas de loditas generalmente rojas, también compuestos de arcillolitas donde predominan los colores grises y rojizos, mezcladas con areniscas cuarzosas. Estas características

litológicas dan como resultado poca resistencia a la erosión y que normalmente estén cubiertos por coluviones (granos finos transportados corta distancia por arroyos difusos) provenientes de laderas correspondientes al grupo Guadalupe. A continuación, se describe el perfil de meteorización generalizado que fue observado en la zona de estudio donde predominan suelos residuales, horizontes de saprolito discontinuos y bloques derivados parcialmente meteorizados que permitieron identificar la unidad de roca a partir de la correlación textural y mineralógica con el saprolito y los bloques derivados.

Se observa de forma superficial un horizonte rico en materia orgánica, de color variable entre café oscuro a negro, deleznable, textura arenosa, con abundantes raíces y restos de material vegetal (Figura 92)

**Suelo Residual (KPgs-IB).** Se observa horizonte de suelo residual de textura arcillosa de color crema, presenta alta consistencia, no se conserva ninguna estructura heredada (Figura 92).



Figura 92: Suelo Residual (IB) de Formación Seca (KPgs)

**Saprolito KPgs-IC.** Se observa horizonte discontinuo de saprolito con espesor de 1 a 3 metros que representa una intercalación de material de textura arcillosa con un material de textura arenosa altamente meteorizados que evidencian una estructura depositacional plano-paralela heredada. Ambos estratos son divididos en S1 y S2 con el fin de diferenciar sus características físicas (Figura 93):

S1: Se observa horizonte de con textura arenosa de color naranja producto de la oxidación de minerales, con espesor de 10-25 cm, con presencia de granos de cuarzo en una matriz arcillosa naranja, el tamaño de grano es fino, presenta

alta consistencia.

S2: Se observa horizonte de color gris con textura arcillosa, con espesor de 30-45 cm, no es posible observar mineralogía, presenta alta consistencia.

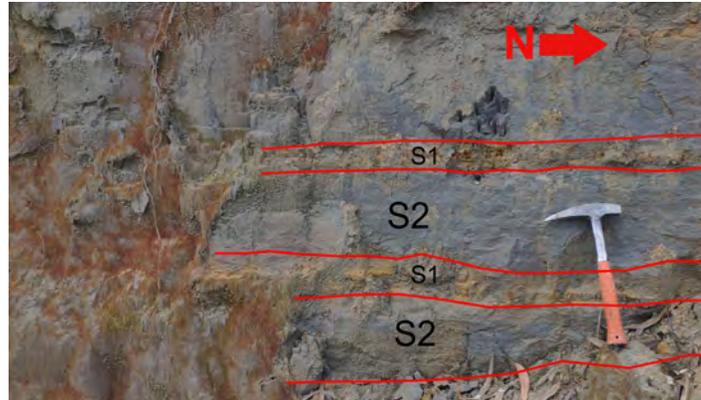


Figura 93: Saprolito (IC) de Formación Seca (KPgs)

**Roca parcialmente meteorizada (IIB).** Se describe la roca a partir de bloques derivados que conservan una estructura depositacional plano paralela de un estrato de arenisca de grano medio y una mineralogía definida por Qz en un 80 % de Qz y 20 % de líticos (Figura 94).



Figura 94: Roca parcialmente meteorizada (IIB)

**Lodolitas de Fusagasugá (Pglf).** La unidad está compuesta por una sucesión de arcillolitas grises y rojizas, en capas delgadas, onduladas paralelas, y por intercalaciones de areniscas cuarzo-feldespáticas, finas a gruesas, pardo

rojizas, con cemento silíceo, en capas delgadas a gruesas, convergentes y ocasionalmente plano paralelas (Figura 95). Por acceso no fué posible evidenciar el perfil de meteorización.



Figura 95: Roca parcialmente meteorizada (IIB)

**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 97). Los depósitos tienen una composición heterogénea de bloques mal seleccionados y subangulosos con tamaños entre los 0.5m- 5m de diámetro en una matriz de suelo en proporciones variables (Figura 96). Los bloques tienen una composición de (KPgs) moderadamente meteorizados (Figura 98).

Tabla 37: Unidades geológicas presentes en el área de influencia para la evaluación de amenaza en el antiguo ETCR La Fila

Símbolo	Unidad	%Área	Peso WoE
KPgs	Formación Seca	65,96	-1,33
Ksg	Formación Guadalupe	30,91	0,97
Pglf	Lodolitas de Fusagasugá	0,75	2,89
Qv	Depósitos de Vertiente	2,38	-6,54



Figura 96: Afloramiento de matriz heterogénea de Depósito de Vertiente



Figura 97: Panorámica superficial de Depósito de Vertiente

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

xPara las coberturas se utilizó la imagen satelital correspondiente al primer semestre del año 2020 de la misión Landsat 7. 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



Figura 98: Panorámica superficial de Depósito de Vertiente con bloques de composición (KPgs)

suelo desnudo. En la Figura 99 se puede observar la distribución de las coberturas. La cuenca está cubierta principalmente de bosques y suelos desnudos, con algunas zonas cubiertas de pastos en el sur y norte de la cuenca. La cobertura urbana se encuentra asociada con el predio del antiguo ETCR y se cuenta con zonas sin datos dada la persistente cobertura de nubes en estas áreas.

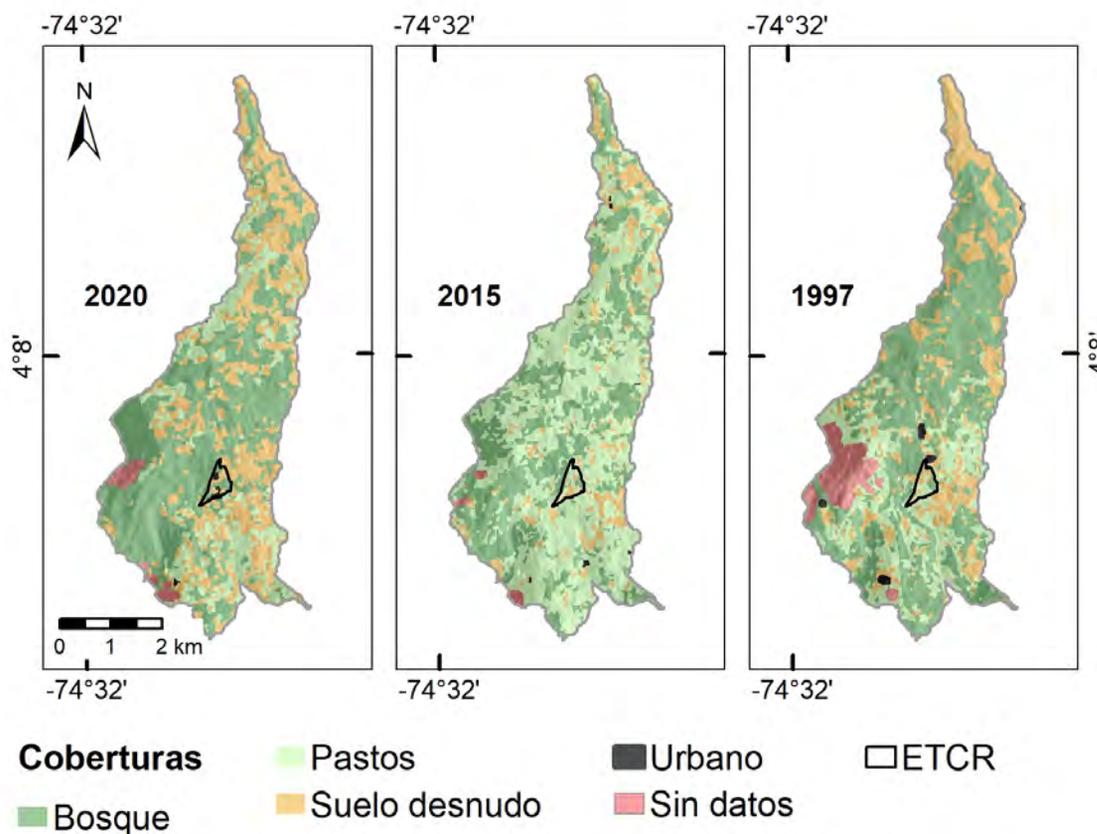


Figura 99: Coberturas actuales.

Para la evaluación de la cobertura también se utilizó 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 La Fila, se utilizaron imágenes satelitales Landsat 7 para el periodo 2001-2003, 2005-2009, 2010-2012 y Lansad 8 2013-2015. Estas fueron tomadas en periodos de tiempo debido a que se realizó un tratamiento a la imagen con el fin de enmascarar las nubes presentes en la zona.

En la Figura 100 se presenta el NDVI de la zona para el periodo mas recientes y lejano. Se puede observar que para el periodo mas reciente hubo un incremento en la vegetación vigorosa en la región centro-sur de la cuenca, sin embargo, en la zona norte aumento la intervención y por ende el NDVI presentó valores menores.

En la Figura 101 se muestra el comportamiento 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 en el último periodo, lo que significa que la vegetación del área de estudio está aumentando su vigorosidad, presentando coherencia con los valores máximos igualmente presentados. Los valores mínimos presentan una baja significativa para el periodo 2010-2012, enmarcando presencia de zonas donde la vegetación se encuentra en muy mal estado o simplemente suelo desnudo en el área de estudio.

Con el fin de determinar las variaciones de la vegetación a lo largo del tiempo se realizó una observación multitemporal del NDVI, la cual permite efectuar un análisis de tres periodos temporales en una sola imagen 2001-2003, 2013-2015 y 2018-2020. 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 respecti-

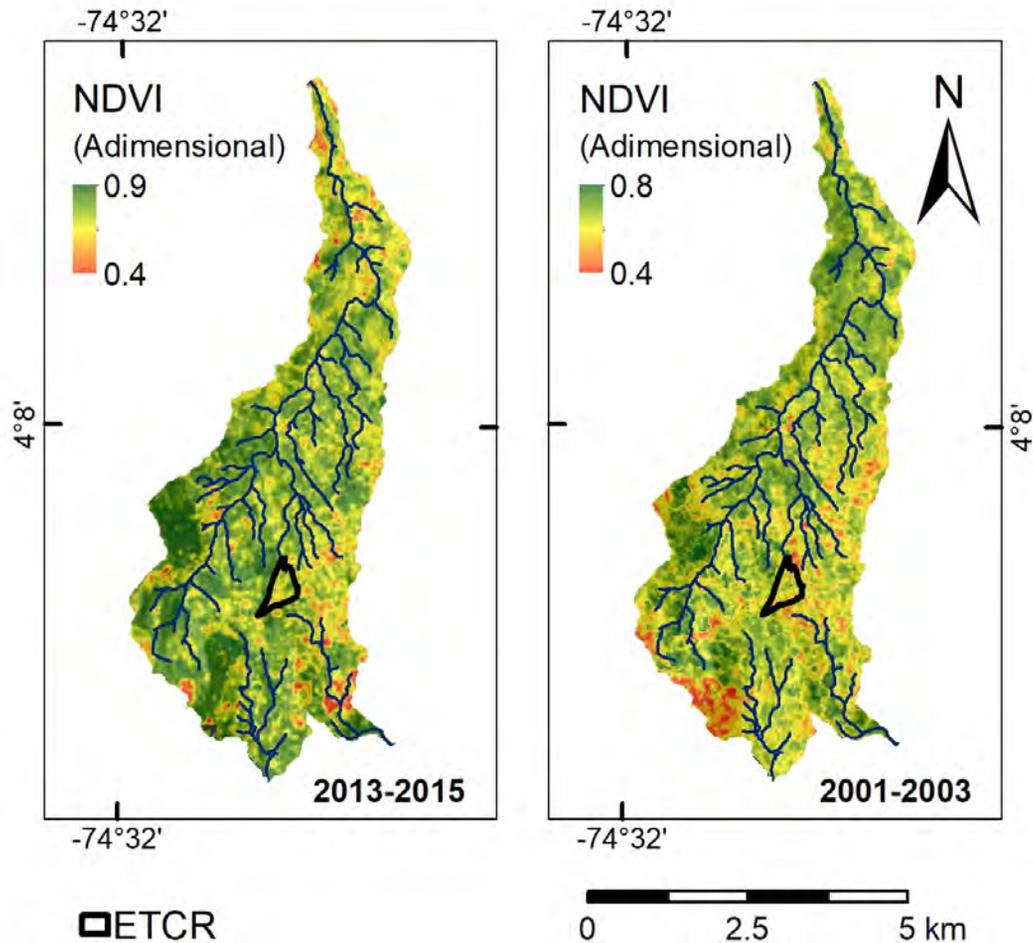


Figura 100: Índice vegetación normalizado La Fila Periodo 2001-2003, 2013-2015

vo 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 (Sander, 1992). Alguno de los colores percibidos en el análisis multitemporal del NDVI se representan en la Figura 102, 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 103, muestra el mapa de combinación RGB multitemporal para los periodos 2001-2003,2013-2015 y 2018-2020 en el área de estudio La Fila. Se puede observar las variaciones que ha sufrido la vegetación en esta cuenca a lo

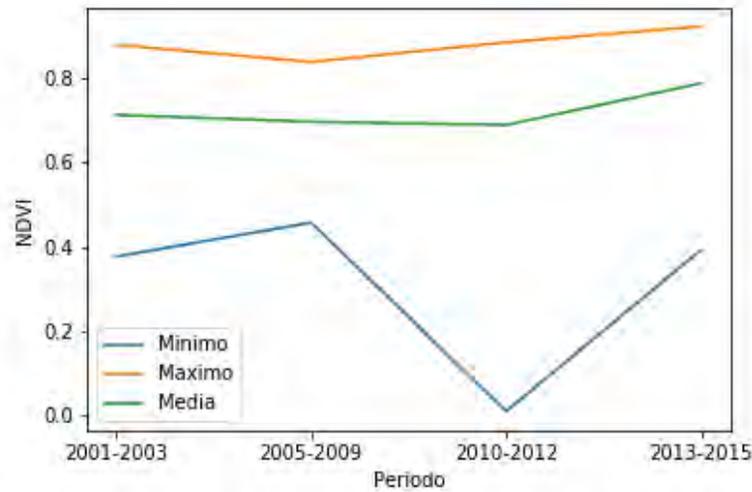


Figura 101: Representación estadística NDVI La Fila

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 102: Tonalidades resultantes de combinación NDVI multitemporal

largo del tiempo debido a los diferentes tonos de color que presenta espacialmente. Donde, el tono de color gris-blanco presente en la parte norte del área de estudio indica presencia de vegetación vigorosa en los 3 periodos analizados, el tono de color naranja presente en la parte centro del área de estudio indica vigorosidad para los periodos 2001-2003 y 2013-2015, el tono de color fucsia en la parte norte indica vigorosidad en la vegetación para los periodos 2001-2003 y 2018-2020, los tonos verdes indican mayor vigorosidad para el año 2013-2015 y los tonos azules indican presencia de vegetación con mayor vigorosidad para el año 2018-2020.

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 1997 y concluye en el año 2020 evaluando como han evolucionado las cuatro categorías

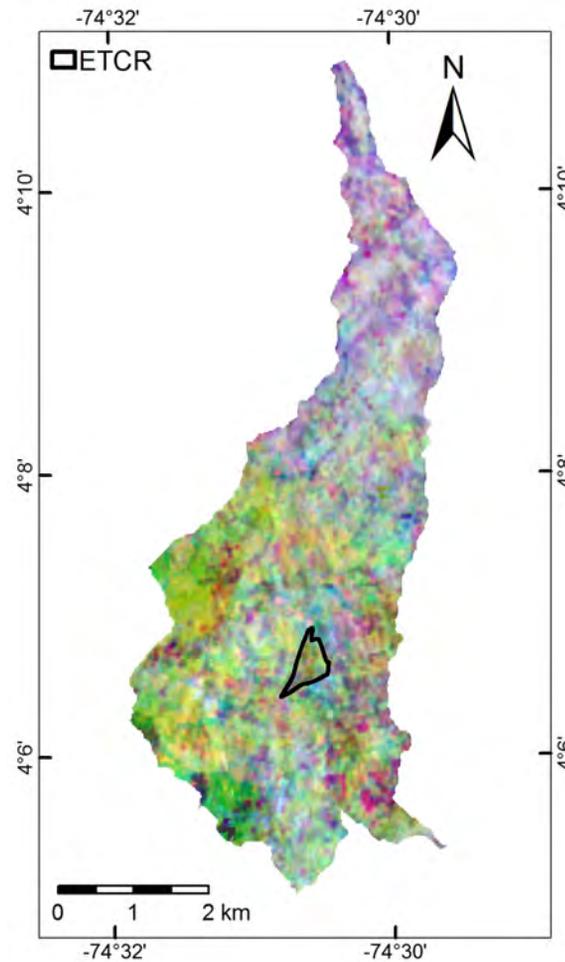


Figura 103: Representación multitemporal NDVI

de cobertura: bosques, pastos, suelos desnudos y construcciones urbanas.

En el año 1997 a partir de una de las imágenes satelitales más antiguas de las que se tiene registro para el área de estudio. En este año la cobertura boscosa alcanzaba poco más del 53% de la cuenca, los pastos un 22% y los suelos desnudos cubrían un 25% del área. Los suelos urbanos, aunque presentes, no son representativos ni cubren un área extensa. Para el año 2015, el área clasificada como suelo desnudo disminuyó un 14% y los bosques disminuyeron 17% al aumentar la cobertura de pastos hasta alcanzar más de 53%.

En el último año analizado, el 2020, las áreas cubiertas de pastos vuelven a dar lugar a los bosques y suelos desnudos al disminuir hasta cubrir tan solo 18% de la cuenca, mientras que los bosques alcanzan un 50% y los suelos desnudos 32%.

Espacialmente, la zona norte se caracteriza por los suelos desnudos mientras que en el centro de la cuenca dominan los pastos y bosques. Al sur los cambios

han sido grandes a lo largo de los años aunque se observa que al occidente prevalecen algunas zonas con bosques. Se tienen zonas sin datos dada la cobertura de nubes muy constante en la zona. Igualmente, algunas zonas cubiertas de nubes son falsamente clasificadas como urbanas como se tiene en el sur de la cuenca.

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 ésta aumenta un 240 % pero representa tan solo un 0,4 % en el año 2020. Igualmente, en el periodo comprendido en este análisis, los pastos disminuyen 16 % y los suelos desnudos aumentan cerca de 33 %. Esto se puede observar en la Figura 104.

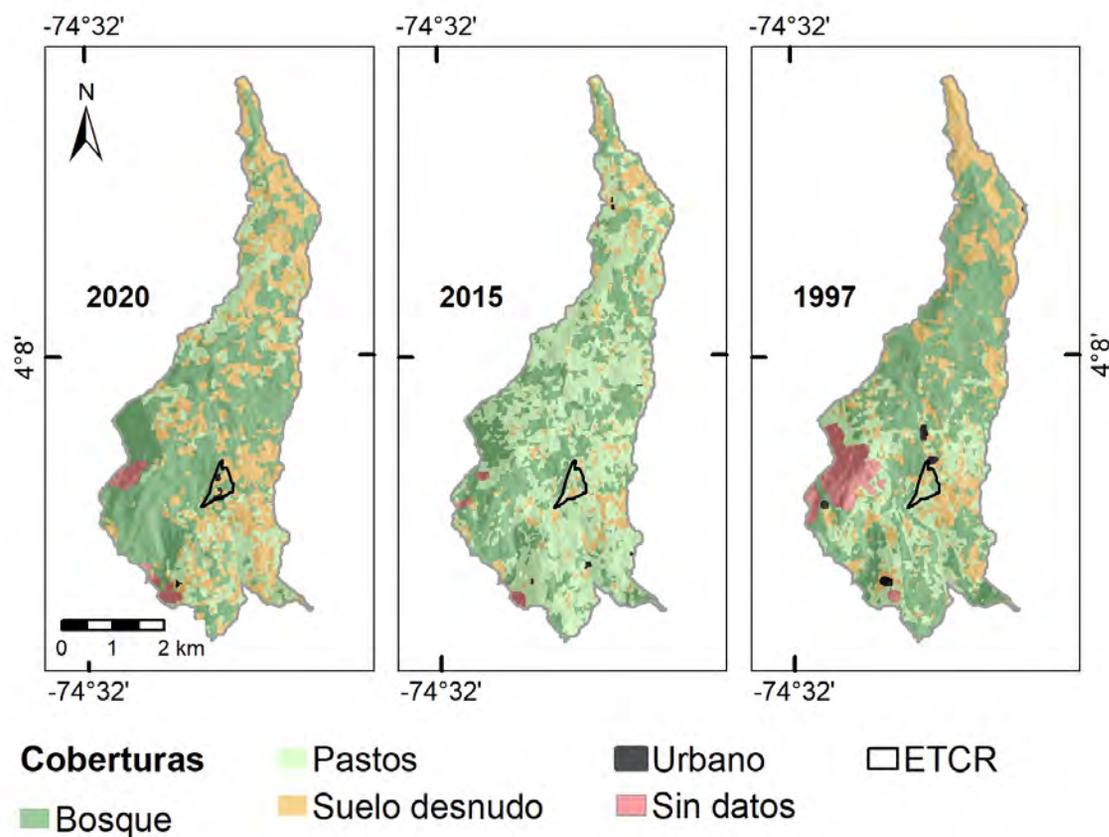


Figura 104: Evolución de las coberturas multitemporal.

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 105 se presenta esta variable y, como se puede observar, se encuentran muy distribuidos los cambios a lo largo de la cuenca. En general las coberturas permanecen relativamente estables, con cambios positivos principalmente en el centro y sur de la cuenca y cambios negativos al norte y sur oriente. Se tienen pequeñas zonas sin datos dada la persistencia de la nubosidad en las imágenes satelitales analizadas.

La Figura 106 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 2015 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 cada 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 asigno 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 (Tabla 38).

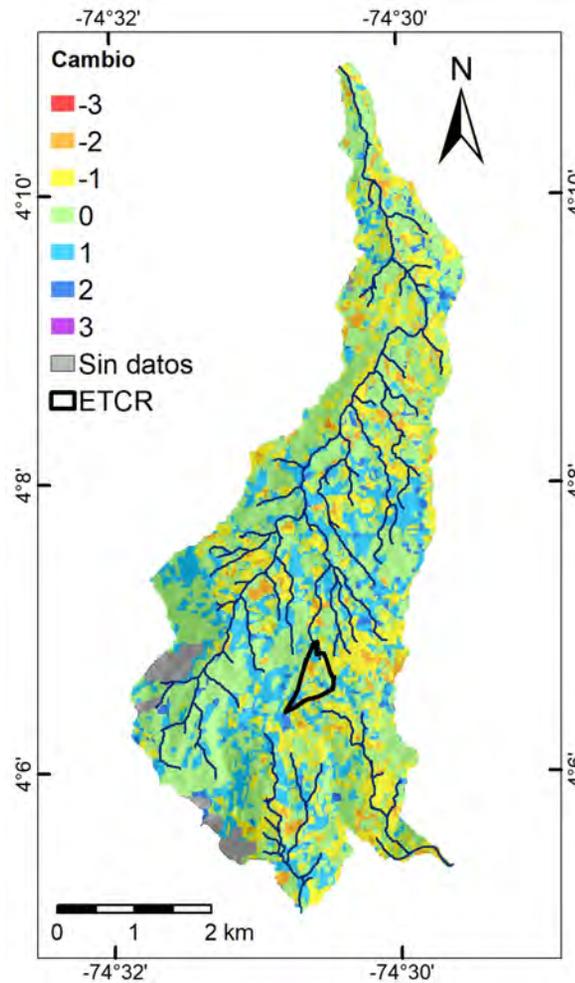


Figura 105: Evolución de las coberturas.

### 8.5.4.3. Relieve relativo (RR)

Con base en los resultados generados y a partir del análisis del mapa de Relieve Relativo se distingue un predominio de los rangos de alturas relativas de 160 a 190 m, de 190 a 220 m, de 220 a 280 m y los mayores a 280 m, con porcentajes respecto al área total de 18,2 %, 16,7 %, 21,6 % y 19,0 % respectivamente; el rango 220 a 280 m posee un porcentaje de 21,6 % lo que lo posiciona como el más alto en términos de su porcentaje de área (ver Tabla 39). Se aprecia una mejor concentración de los rangos predominantes en la zona Oriental de la zona de estudio y en su zona sur (vFigura 107).

Mientras que los rangos de alturas que son menores a 135 m y que van de 135 a 160m, representan solo el 24,4 % del área total y se concentran principalmente en la zona noroccidental de la zona de estudio y con unas concentraciones más pequeñas en la zona sur (Figura 107).

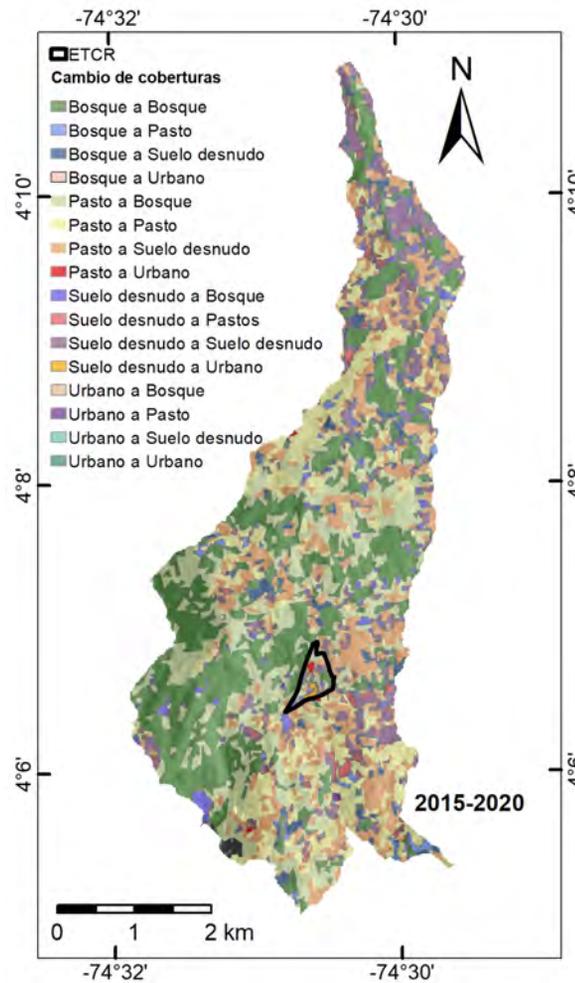


Figura 106: Cambio coberturas año 2015-2020

#### 8.5.4.4. Pendiente (S)

En la zona de estudio predominan los rangos de pendiente de 5 a 8°, de 8 a 10°, de 10 a 12°, y de 12 a 20° con porcentajes respecto al área total de 16,2 %,14,7 %,15,0 %,34,3 % respectivamente; el rango de 12 a 20° con un porcentaje de 34,3 % se posiciona como el más alto en términos de su porcentaje de área (ver Tabla 40). Las concentraciones de estos rangos se encuentran distribuidos a lo largo de toda la zona de estudio.

Los rangos de pendientes menores a 5°,de 20 a 30°,y mayores a 30°,representan solo un 19,8 % del área total y se presentan distribuidos en toda la zona de estudio,con concentraciones mayores en la parte Sur específicamente en la zona sur-occidental (Figura 108).

Tabla 38: Evolución de cobertura del antiguo ETCR La Fila

Cambios	Área %	Peso Woe
Bosque a Bosque	28,66	-0,16
Bosque a Pasto	1,60	-0,85
Bosque a Suelo desnudo	4,69	-1,95
Bosque a Urbano	0,01	-4,01
Pasto a Bosque	19,71	0,83
Pasto a Pasto	14,13	0,26
Pasto a Suelo desnudo	19,57	-0,63
Pasto a Urbano	0,19	-4,01
Suelo desnudo a Bosque	2,63	0,58
Suelo desnudo a Pastos	1,65	-1,58
Suelo desnudo a Suelo desnudo	6,87	-0,95
Suelo desnudo a Urbano	0,14	-3,65
Urbano a Bosque	0,01	1,34
Urbano a Pasto	0,12	1,09
Urbano a Suelo desnudo	0,04	-2,49
Urbano a Urbano	0,01	-0,45

Tabla 39: Categorías de la variable Relieve Relativo.

	Rangos (m)	Porcentaje del área total (%)	Peo Woe
Relieve bajo	< 135	10,63	-8,13
	135 a 160	13,81	0,15
Relieve medio	160 a 190	18,22	-0,29
	190 a 220	16,70	-0,16
Relieve alto	220 a 280	21,64	0,29
	> 280	18,99	0,53

Tabla 40: Categorías de la variable Pendiente.

	Rangos (m)	Porcentaje del área total (%)	Pesos Woe
Plana a suavemente	< 5	8,67	-1,90
Inclinada	5 a 8	16,15	-0,39
	8 a 10	14,70	-0,95
Muy inclinada	10 a 12	15,00	-0,66
	12 a 20	34,33	-0,64
Muy abrupta	20 a 30	8,31	2,04
Escarpada	> 30	2,85	1,35

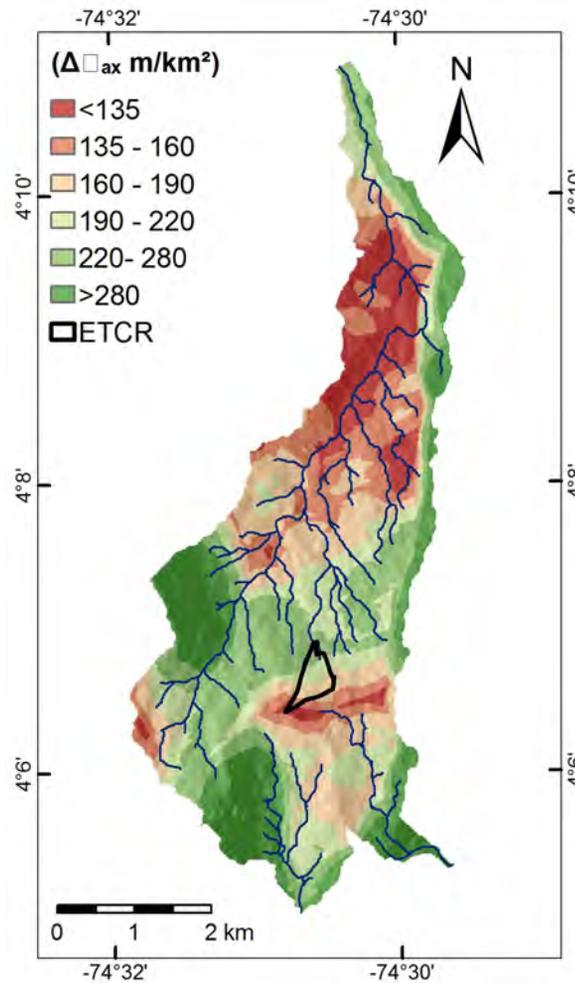


Figura 107: Mapa de índice de relieve relativo para el antiguo ETCR La Fila

### 8.5.4.5. Índice de distancia a las fallas (DF)

Las distancias a fallas que predominan comprenden los rangos de 50 a 850 m estos representan un total de 79,2%, siendo el rango de 350 a 500 m el que se encontraba con mayor porcentaje con respecto al área total con un valor de 15,0% (ver Tabla 41). Estos valores predominan en la parte Occidental del área de estudio. Por otro lado, para los valores restantes se tiene un porcentaje con respecto al área total de 20,8% siendo el rango de menor a 50 m el más bajo con respecto al área total con un 6,3%, este valor se encuentra concentrado en la parte Occidental del área de estudio con menores apariciones en la parte nororiental y suroriental. En general los rangos con mayores porcentajes que comprenden los rangos de 50 a 850 m incluyendo el rango de menor a 50 se concentran principalmente en la zona occidental del área de estudio (Figura 109).

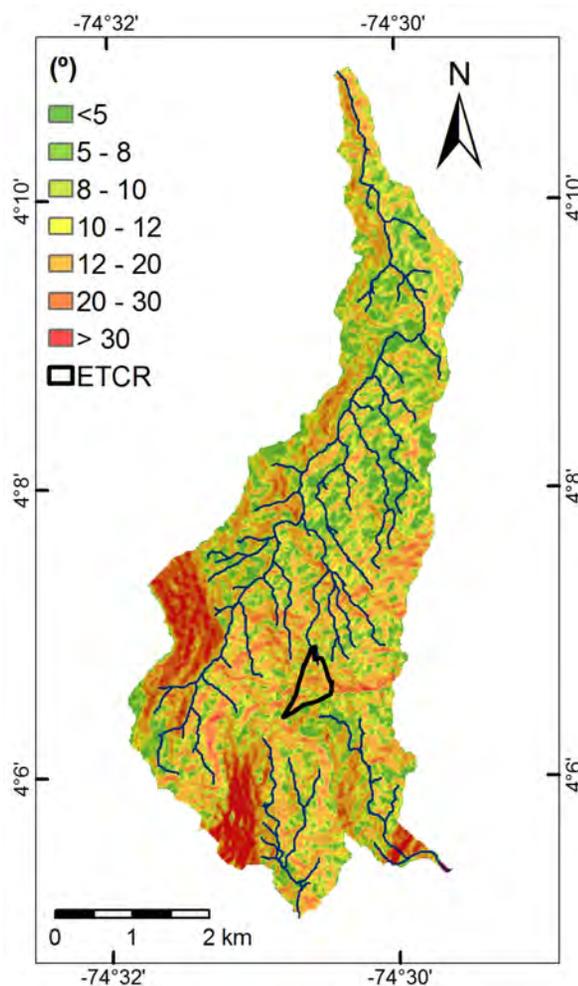


Figura 108: Mapa de índice de Pendiente para el antiguo ETCR La Fila

Tabla 41: Tabla del Índice de distancia a las fallas, antiguo ETCR La Fila

Rangos	Área %	Peso Woe
< 50	6,38	-0,08
50 a 150	12,09	0,11
150 a 250	12,67	-0,32
250 a 350	11,88	-0,75
350 a 500	15,05	0,25
500 a 650	13,30	-0,67
650 a 850	14,18	-0,35
850 a 1000	7,32	0,10
> 1000	7,12	1,25

#### 8.5.4.6. Cinemático (Cin)

Los ambientes geológicos y estructurales que enmarcan las laderas han sido considerados como factores relevantes en la ocurrencia de movimientos en masa

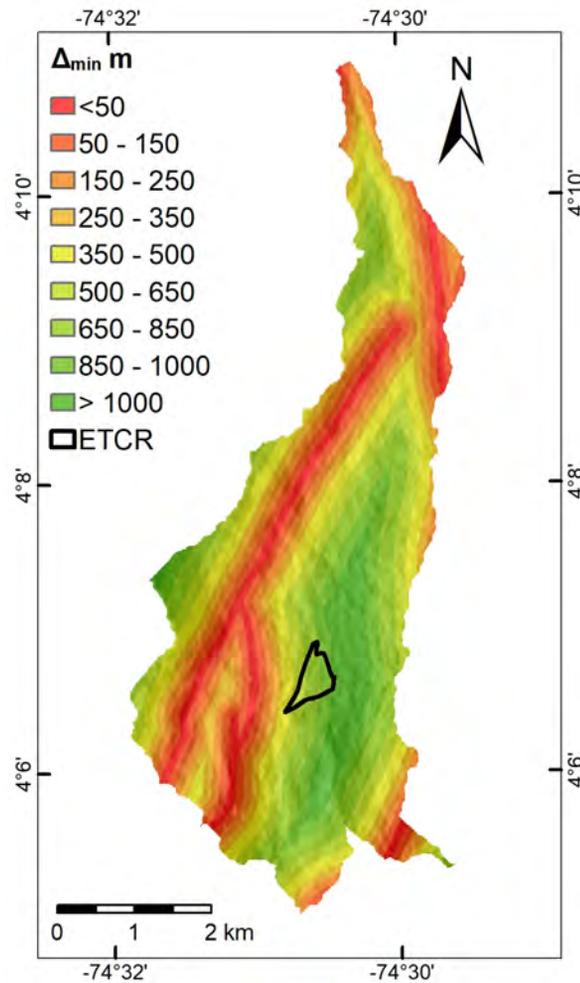


Figura 109: Mapa del Índice de distancia a las fallas, antiguo ETCR La Fila

(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 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 42.

Tabla 42: 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	Peso WoE
Ortoclinal	$ A - \alpha  = 90^\circ \pm 45^\circ$ o $270^\circ \pm 45^\circ$			-6,54
Cataclinal	$315^\circ <  A - \alpha  < 45^\circ$	overdip	$S > \theta$	0,03
		dip	$S = \theta$	-0,56
		underdip	$S < \theta$	-0,17
Anaclinal	$135^\circ <  A - \alpha  < 225^\circ$	empinado	$S > \theta$	-0,24
		normal	$S = \theta$	1,28
		suave	$S < \theta$	-3,99
No estructural	Depósitos			-1,92

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 110. La cuenca es dominada por las clases ortoclinal y cataclinal underdip con pequeñas áreas asociadas a las vertientes bajas de laderas anaclinales suaves. Al suroccidente de la cuenca, la mayores pendientes generan laderas anaclinales empinadas, mientras que al sur en las cuencas que drenan al sur se encuentran laderas cataclinales overdip además de ortoclinales, anaclinales suaves y cataclinales underdip.

### 8.5.4.7. 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

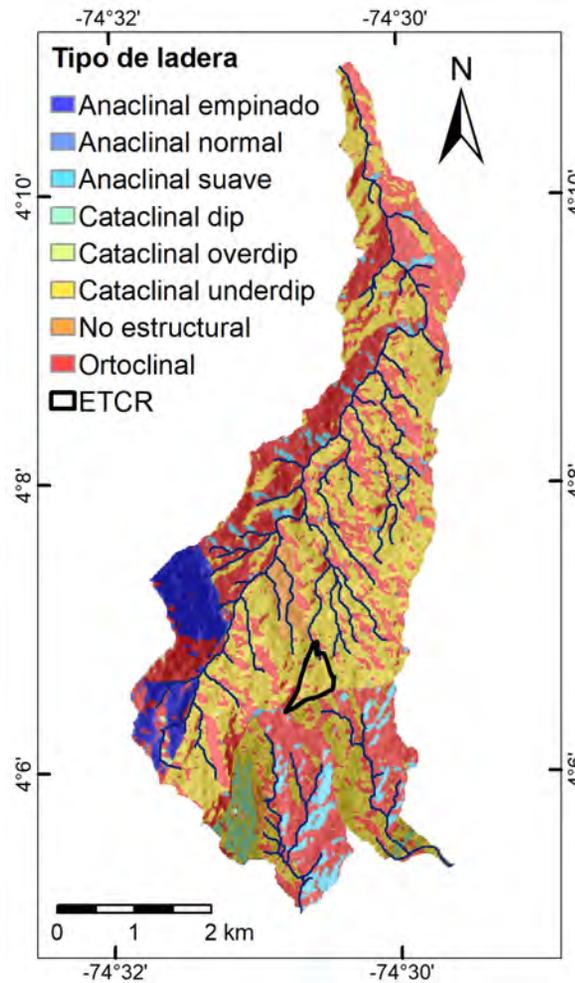


Figura 110: Clasificación cinemática de laderas.

edáfica y la tendencia del suelo a generar escorrentía. Se obtuvo con el software Whitebox GAT y la herramienta *Wetness Index*, cumpliendo la ecuación:

$$Wi = Ln \frac{As}{\tan(slope)} \tag{8.6}$$

Donde *As* es el mapa raster de acumulación de flujo y *Slope* es el raster de pendiente en grados, generado a partir del modelo de elevación corregido. Esta variable se dividió en seis clases. La Figura 111 y la Tabla 43 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 con su categoría de “No Acumula” , de 2 a 3 con su categoría “Bajo” y de 3 a 4 con

su categoría "Medio", con porcentajes de 21,4% ,21,5%, y 17,3% respectivamente (ver Tabla 43) ; de acuerdo a la Figura 111, estos rangos se encuentran distribuidos por toda el área de estudio.

Para los rangos de -5 a 2 "Muy bajo", de 4 a 5 "Alto", y de mayores a 5 "Muy Alto" se tienen valores con respecto al porcentaje de área total más bajos de 13,7%, 11,5% , 14,5% y se ven ampliamente distribuidos por toda la zona de estudio (Figura 111).

Tabla 43: Índice de humedad topográfica.

	Rangos (m)	Porcentaje del área total (%)	Peso WoE
No acumula	< -5	21,4	-0,49
Muy bajo	-5 a 2	13,7	0,91
Bajo	2 a 3	21,5	0,03
Medio	3 a 4	17,3	-0,09
Alto	4 a 5	11,5	-0,31
Muy alto	> 5	14,5	-0,37

#### 8.5.4.8. 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).

El mapa de curvatura resultante (Figura113), conformado por, el mapa de curvatura de perfil y el mapa de curvatura plana, que se muestran en la Figura 112a y la Figura 112b respectivamente. Esta variable se divide en nueve categorías como lo muestra la Tabla 45, que además, indica el porcentaje de área

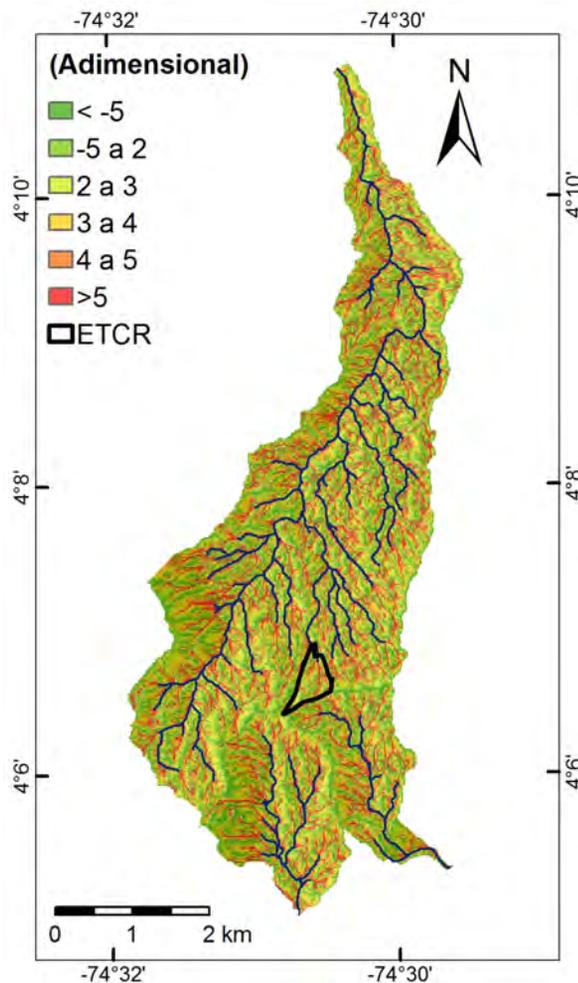


Figura 111: Mapa de índice de humedad topográfica para el antiguo ETCR La Fila

Tabla 44: Rangos de las formas del terreno.

Rango	Categoría Mapa Perfil	Categoría Mapa Planar
< -0,01	Cóncavo	Convexo
- 0,01 a 0,001	Plano	Plano
> 0,001	Convexo	Cóncavo

de la zona de estudio y los pesos asignados a cada clase para la evaluación de la amenaza.

Las clases de geformas que más se observan en el mapa de curvatura (Figura 113) según las estadísticas que muestra la Figura 114 son las cóncava-cóncava, convexa-convexa, convexa-cóncava y cóncava-convexa con un porcentaje respecto al área total de 37,0 % 33,1 % 15,3 % y 12,7 % respectivamente, y a su vez

Tabla 45: Clases de geformas con sus respectivas áreas de ocupación en la zona de estudio y el peso peso asignado para la evaluación de la amenaza.

	Clases	Símbolo	%Área	Peso WoE
Pisos inclinados	Plano plano	P-P	1,68	0,53
Valle inclinado	Cóncavo plano	C-P	0,093	-1,23
Colinas inclinadas	Convexo plano	Cx-P	0,06	-0,27
Cuenca abierta inclinada	Plano cóncavo	P-C	0,01	0,10
Cuenca cerrada inclinada	Cóncavo cóncavo	C-C	37,04	-0,26
Cuenca protuberante inclinada	Convexo cóncavo	Cx-C	15,28	-0,19
Colinas empotradas	Cóncavo convexo	C-Cx	12,73	-0,29
Colinas infladas inclinadas	Convexo convexo	Cx-Cx	33,11	-3,06
Crestas abiertas inclinadas	Plano convexo	P-Cx	0,005	-3,36

estas geformas 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 muy semejante de las clases de geformas.

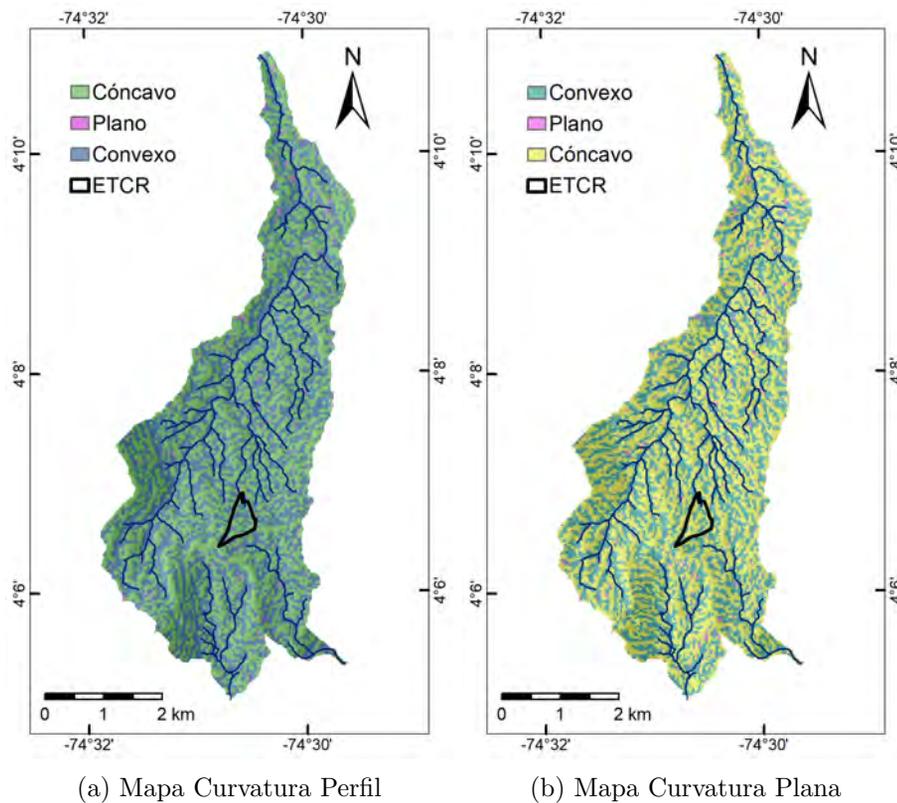


Figura 112: Mapa de Curvatura Perfil y Plana antiguo ETCR La Fila

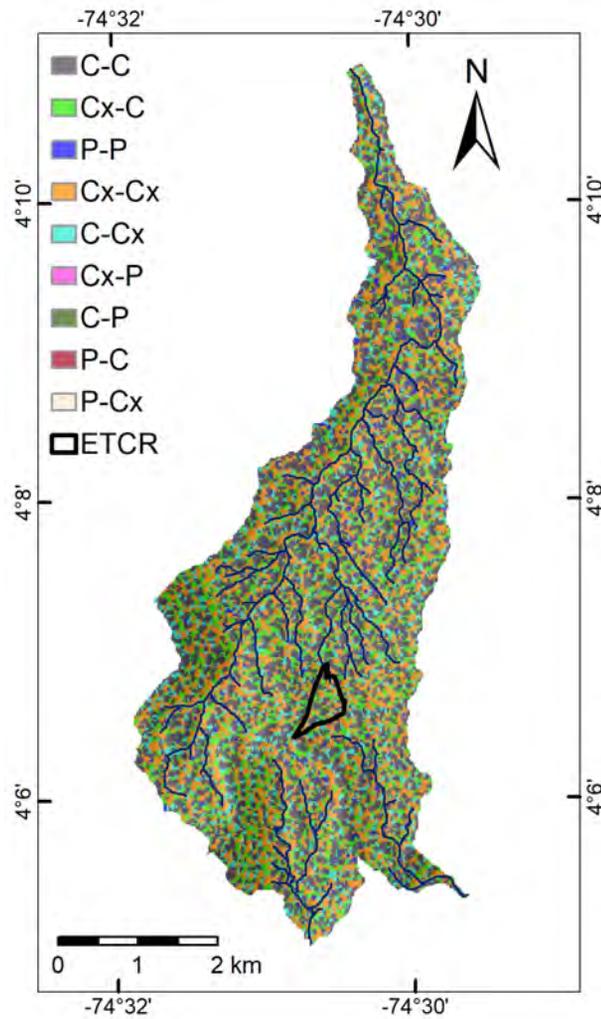


Figura 113: Mapa de Curvatura, antiguo ETCR La Fila

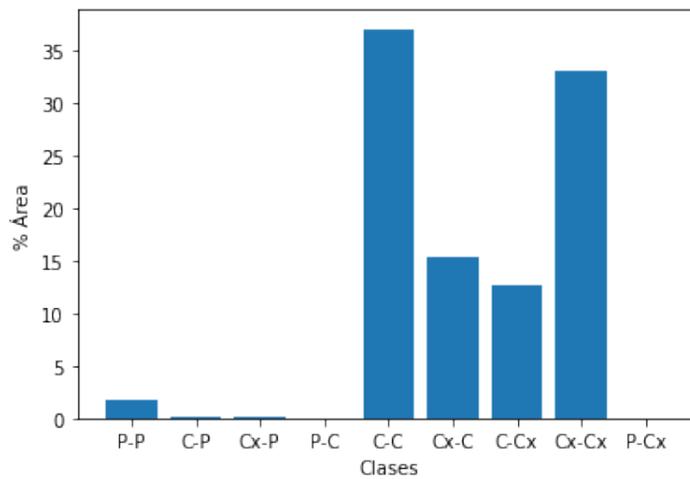


Figura 114: Gráfica de clases de geformas por su porcentaje en área del antiguo ETCR La Fila

### 8.5.5. Mapa de susceptibilidad con AHP y peso de la evidencia

La Ecuación 8.7 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 el peso de la evidencia:

$$IS = 21,7S + 6,7Cin + 3,3Cu + 14,0RR + 8,1DF + 6,5TWI + 18,2Ce + 21,5Gs \tag{8.7}$$

La Figura 115 presenta el mapa de susceptibilidad continua por movimientos en masa para el área de influencia del antiguo ETCR La Fila.

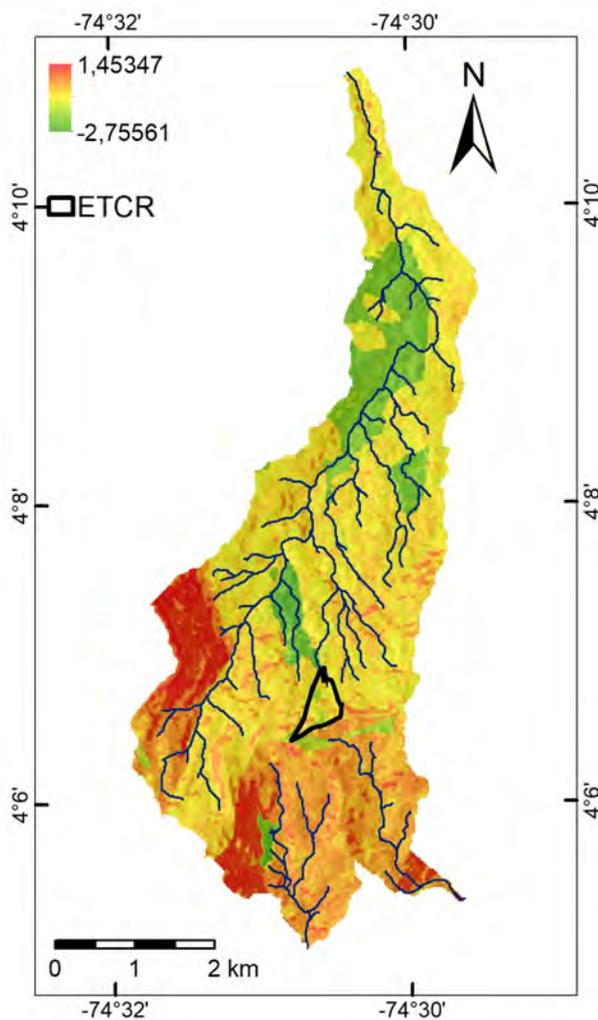


Figura 115: Susceptibilidad continua por movimientos en masa.

### 8.5.6. Modelo Regresión Logística

El método estadístico multivariado denominado Regresión Logística estima la relación entre una variable dependiente (la ocurrencia de movimientos en masa) de valores dicotómicos de 0 (no ocurrencia) y 1 (si ocurrencia), con un grupo de variables independientes, en este caso las variables condicionantes del terreno. a ventaja de la RL es que dichas variables predictoras no requieren tener distribución normal y pueden ser discretas o continuas (categóricas o no categóricas), o una combinación de ambas (Atkinson y Massari, 1998).

La relación de dependencia entre la ocurrencia de movimientos en masa y las variables es expresada cuantitativamente como:

$$P(y) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$$

Dónde  $P(y)$  es la probabilidad especial estimada de la ocurrencia de movimientos en masa y se encuentra en el rango de 0 a 1. Y  $z$  es la siguiente combinación lineal de las variables independientes:

$$z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_nx_n$$

Dónde  $b_0$  es el intercepto del modelo según el modelo de RL, los valores  $b_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ) son los coeficientes de la regresión logística, es decir, los pesos de las variables, y los valores  $x_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ) son las variables independientes. El modelo final es una regresión logística de la ocurrencia de movimientos en masa (presencia o ausencia) basado en las variables independientes.

La RL es uno de los métodos estadísticos multivariados más usados para calcular la susceptibilidad por movimientos en masa a escalas medias a regionales (Ayalew y Yamagishi, 2005; Brenning, 2005; Lee y Pradhan, 2007)

La Figura 116 presenta el mapa de susceptibilidad continua por movimientos en masa para el área de influencia del antiguo ETCR La Fila con RL.

### 8.5.7. Evaluación de los modelos de susceptibilidad

Para evaluar el desempeño y capacidad de predicción de los mapas de susceptibilidad obtenidos mediante los modelos implementados existen diferentes métodos. Para el presente estudio se presenta el Área Bajo la curva (AUC) (Fawcett, 2006). El AUC no solo permiten evaluar el ajuste y predicción del modelo, sino que además se convierten en un criterio para seleccionar el modelo

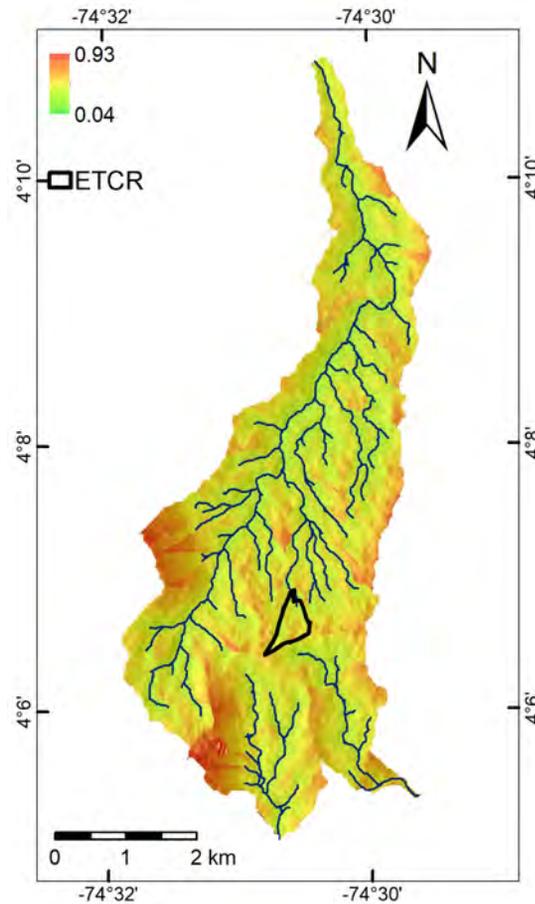


Figura 116: Susceptibilidad continua por movimientos en masa.

más adecuado, muy útil para el presente estudio donde se implementan diferentes métodos y para la selección del rango de clasificación final del mapa. En la Figura 117 presenta los resultados del rendimiento de predicción y de éxito para el método AHP mas peso de la evidencia de la zona y en la Figura 118 se observan los valores de predicción y éxito para el método RL

El mapa final corresponde a el modelo obtenido y se representa en la Figura 119 el cual presenta un proceso de depuración y ajuste dado en el Decreto 1807 del 2014, el cual corresponde a las zonas con valores de pendiente inferior a  $5^\circ$  y sin evidencias de susceptibilidad se consideran categoría baja. En la Tabla 46 se resumen el área y la probabilidad de ocurrencia por movimientos en masa para el área.

Finalmente se realiza un suavizado eliminando las zonas con área mínimas por debajo de  $2500 \text{ m}^2$ , área que representa a 16 celdas ( $12,5 \times 12,5$ ), lo cual corresponde a la unidad mínima cartografiable.

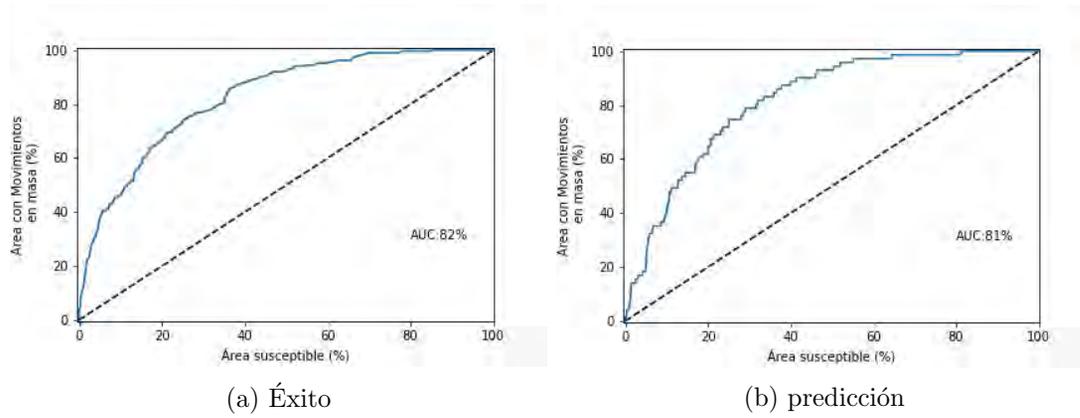


Figura 117: Area bajo la curva para el método AHP y peso de la evidencia

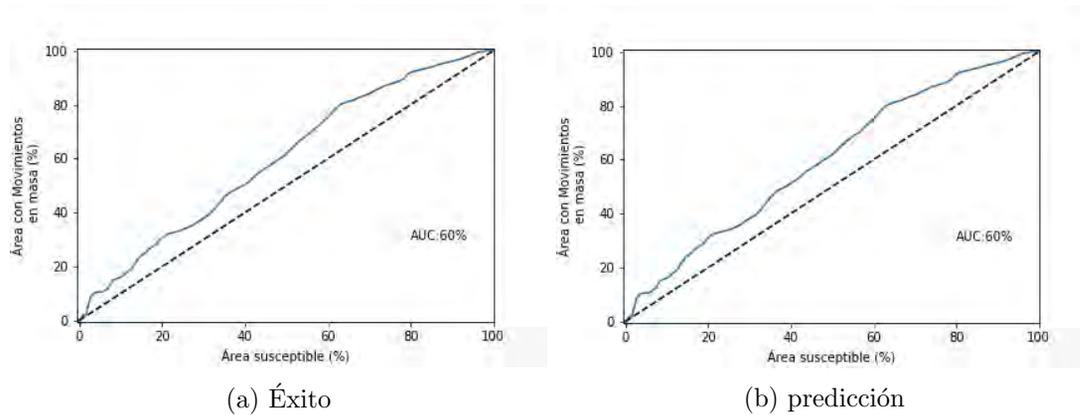


Figura 118: Area bajo la curva para el método regresión logística

Tabla 46: Mapa de susceptibilidad final La Fila.

Categoría	Área %	Probabilidad
Baja	31,37	$6,99E - 5$
Media	42,10	$1,55E - 3$
Alta	26,53	$7,35E - 3$

## 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

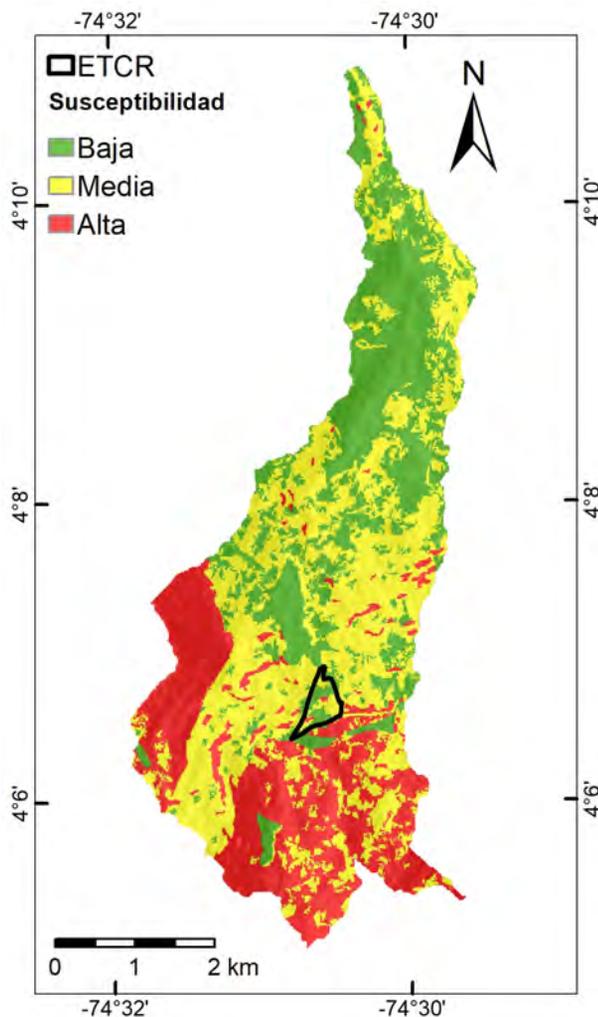


Figura 119: Susceptibilidad final por movimientos en masa.

transmisividad del suelo. La humedad del suelo es calculada como:

$$W = \frac{Qa}{bT \sin \theta} \tag{8.8}$$

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:

$$W = \frac{h}{z_t} \tag{8.9}$$

Donde  $h$  es el espesor del suelo saturado y  $z_t$  el espesor total de suelo. Combinando las ecuaciones 8.8 y 8.9 se puede estimar la saturación relativa del perfil

de suelo como:

$$\frac{h}{z_t} = \frac{Qa}{bT \sin \theta} \quad (8.10)$$

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.

$$\rho_s g z_t \sin \theta \cos \theta = c' + \left( \rho_s - \rho_w \frac{h}{z_t} \right) g z \cos^2 \theta \tan \phi \quad (8.11)$$

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  $h/z$ :

$$\frac{h}{z_t} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) + \frac{c'}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} \quad (8.12)$$

Finalmente, acoplado el modelo hidrológico y el modelo de estabilidad se obtienen la siguiente ecuación:

$$\frac{a}{b} = \frac{T}{Q} \sin \theta \left[ \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) + \frac{c'}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} \right] \quad (8.13)$$

A partir de la ecuación 8.13 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:

$$\tan \theta < \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \tan \phi + \frac{c'}{\rho_s g z \cos^2 \theta} \quad (8.14)$$

Y las celdas inestables en condiciones secas ( $h/z_t = 0$ ) se denominan incondicionalmente inestables y cumplen la siguiente condición:

$$\tan \theta \geq \tan \phi + \frac{c'}{\rho_s g z \cos^2 \theta} \quad (8.15)$$

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 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 8.16 que se basa en la relación inversa de la pendiente con el espesor del suelo.

$$h_i = h_{max} \left[ 1 - \frac{\tan \theta_i \cdot \tan \theta_{min}}{\tan \theta_{max} \cdot \tan \theta_{min}} \cdot \left( 1 - \frac{h_{min}}{h_{max}} \right) \right] \quad (8.16)$$

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 (2002) 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).

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

Tabla 47: Parámetros geotécnicos para las unidades geológicas superficiales.

Unidad	Tipo de suelo	$c'$ (kPa)	$\phi^\circ$	$\gamma_s(kN/m^3)$	$k_s(m/s)$
KPgs	CL	16	28	18	$5,0x10^{-8}$
Ksg	SM	12	30	20	$5,4x10^{-6}$
Pglf	ML	11	32	18	$7,0x10^{-8}$
Qv	SW-SM	16	28	19	$5,0x10^{-8}$

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. Las intensidades fueron estimadas asumiendo una duración de la lluvia igual al tiempo de concentración más bajo entre las unidades hidrológicas analizadas.

Tabla 48: Escenarios de lluvia establecidos para periodos de retorno ( $Tr$ ) de 10, 100 y 500 años.

Tr	Intensidad (mm/h)
10	60,53
100	80,58
500	95,74

En las Figuras 120, 121 y 122 se presentan la amenaza por movimientos en masa superficiales según las condiciones de estabilidad para cada escenario de lluvia.

A partir de los resultados para las distintas intensidades de lluvia se observa que las condiciones de mayor inestabilidad se concentran en las zonas de mayor inclinación de las laderas ubicadas en el costado SW de la cuenca Q. La Laja, en el cual se han identificado algunos movimientos en masa activos a partir del inventario de procesos morfodinámicos.

## 8.7. Amenaza por movimientos en masa detonados por sismo

### 8.7.1. Sismicidad histórica

Según el registro de sismicidad histórica de Colombia en el municipio de Icononzo no se tiene registro de sismos que hayan causado afectaciones en el municipio y solo se registra un evento sísmico el 20 de junio de 2013 con una magnitud de 2,6 (<http://sish.sgc.gov.co/>).

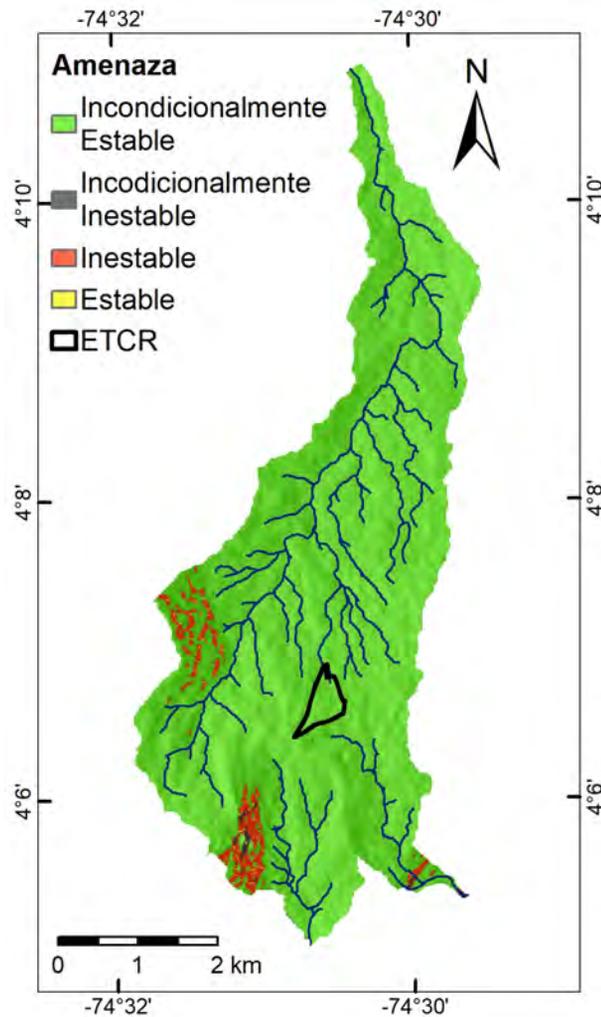


Figura 120: Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 10 años.

### 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 detallada. 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 la superficie; el método permite analizar como una ladera podría comportarse durante un evento sísmico, mediante el calculo del desplazamiento de una masa

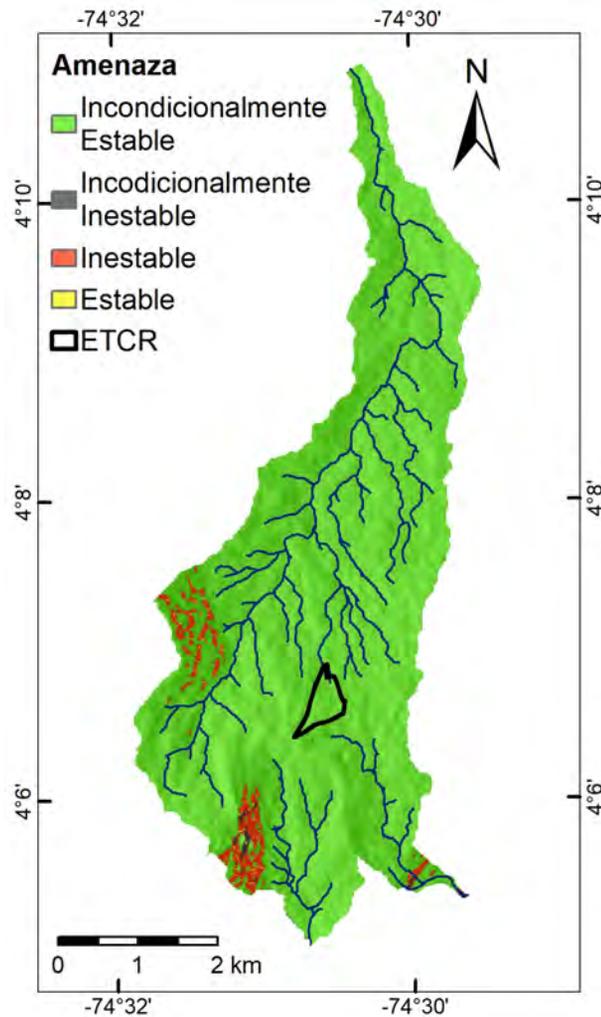


Figura 121: Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 100 años.

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 123) (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

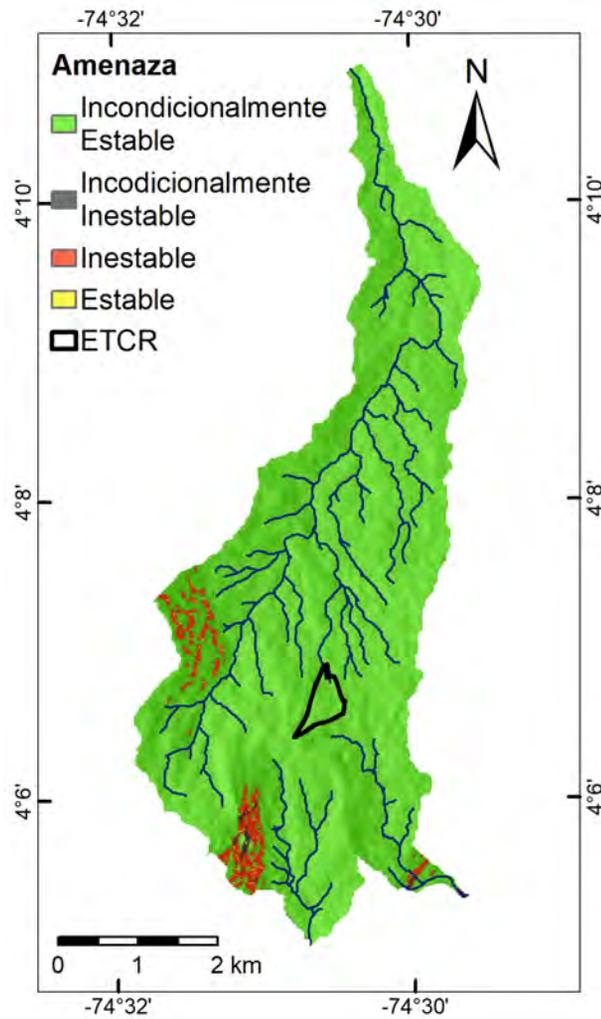


Figura 122: Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 500 años.

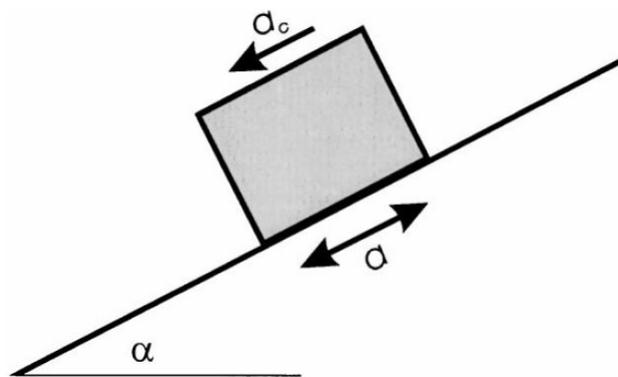


Figura 123: Bloque deslizando método de Newmark (Jibson, Harp, y Michael, 2000)

función del factor de seguridad estático y la geometría de la ladera.

$$a_c = (FS - 1) \cdot \sin \alpha \quad (8.17)$$

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.

$$FS = \frac{c'}{\gamma \cdot t \cdot \sin \alpha} + \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} - \frac{m \cdot \gamma_w \cdot \tan \phi'}{\gamma \cdot \tan \alpha} \quad (8.18)$$

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.

$$\log D_N = 0,215 + \log \left[ \left(1 - \frac{a_c}{PGA}\right)^{2,341} \cdot \left(\frac{a_c}{PGA}\right)^{-1,438} \right] \pm 0,510 \quad (8.19)$$

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 Icononzo se presenta un rango de 0,1 a 0,2 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 8.20 que se basa en la relación inversa de la pendiente con el espesor del suelo.

$$h_i = h_{max} \left[ 1 - \frac{\tan \theta_i \cdot \tan \theta_{min}}{\tan \theta_{max} \cdot \tan \theta_{min}} \cdot \left( 1 - \frac{h_{min}}{h_{max}} \right) \right] \quad (8.20)$$

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 (2002) 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 ya descritas en la Figura 4.

La zonificación de la amenaza por movimientos en masa detonados por sismo 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:

Tabla 49: Parámetros geotécnicos para las unidades geológicas superficiales.

Unidad	Tipo de suelo	$c'$ (kPa)	$\phi^\circ$	$\gamma_s(kN/m^3)$	$k_s(m/s)$
KPgs	CL	16	28	18	$5,0x10^{-8}$
Ksg	SM	12	30	20	$5,4x10^{-6}$
Pglf	ML	11	32	18	$7,0x10^{-8}$
Qv	SW-SM	16	28	19	$5,0x10^{-8}$

- 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.

En la La Figura 124 se observa la amenaza por movimientos en masa detonadas por sismo. Las zonas consideradas como amenaza alta en el escenario del terreno saturado ante un evento sísmico, se concentran en la zona SW con un 3,9% del área total de la cuenca en las laderas con inclinación mayor a  $30^\circ$  (Tabla 40). En en estas zonas también se evidencia inestabilidad en el análisis de susceptibilidad por movimientos en masa (Figura 119), siendo evidente la fuerte influencia de la pendiente y la saturación de los suelos en la estabilidad de las laderas SW.

## 8.8. Mapas de amenaza

Para obtener el mapa por movimientos en masa se cruza los tres escenarios evaluados: (i) susceptibilidad (AHP + WoE) (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 escenario (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

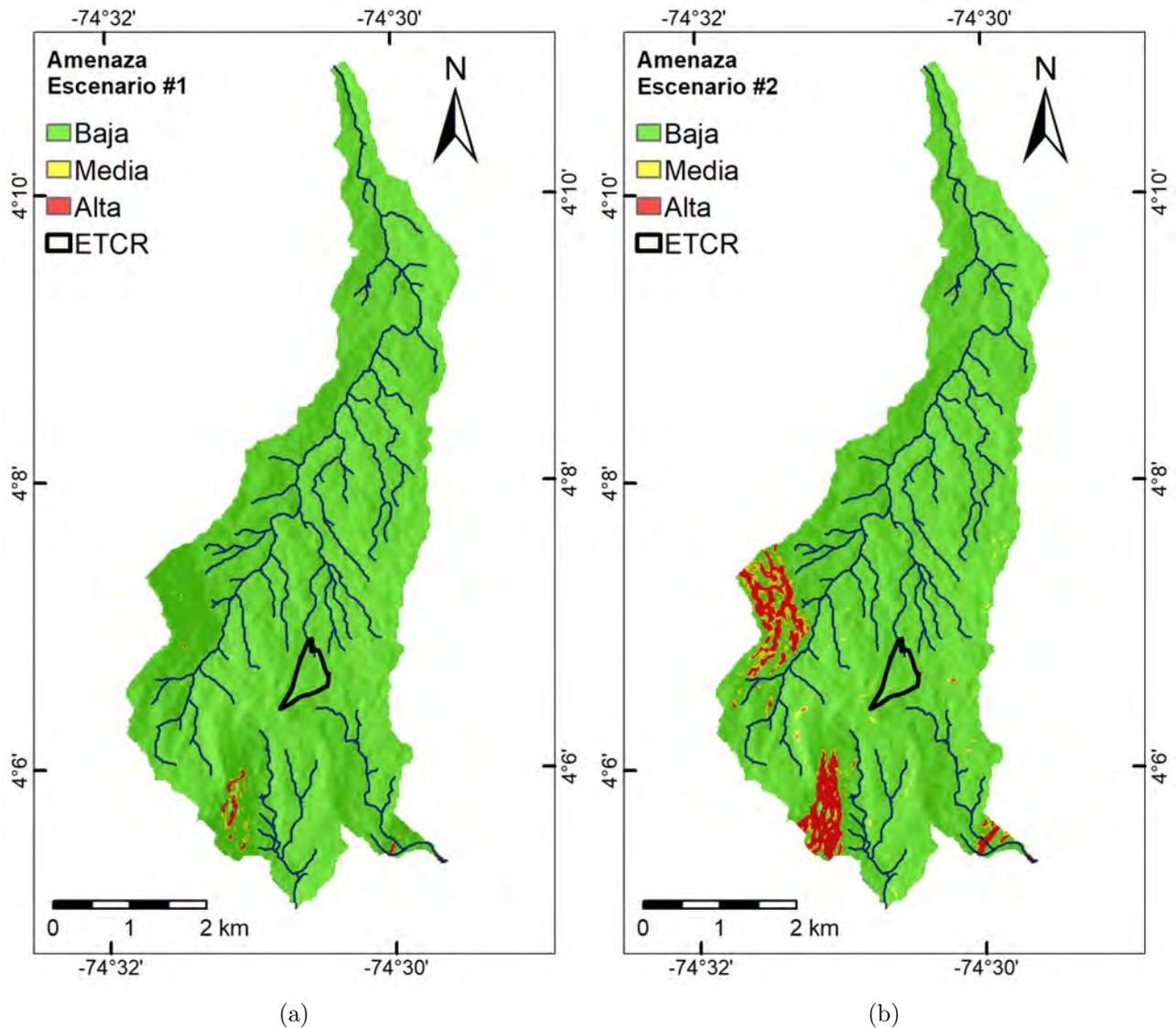


Figura 124: Amenaza por movimientos en masa detonados por sismo. a) Escenario #1 condición seca. b) Escenario #2 condición saturada.

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 125 presenta el mapa de amenaza por movimientos en masa combinando los diferentes escenarios del factor detonante.

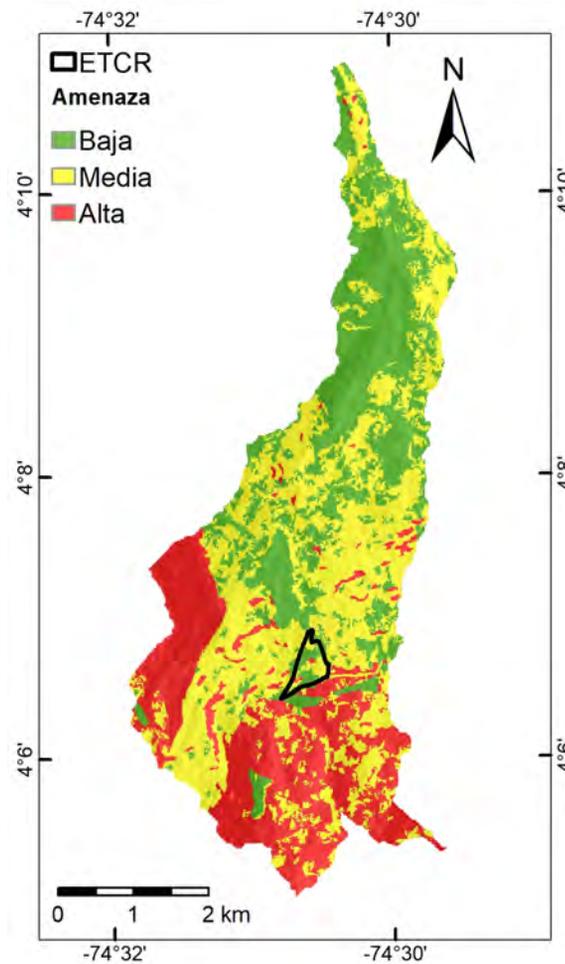


Figura 125: Mapa de amenaza por movimiento en masa

Las áreas con amenaza alta por movimientos en masa ocupan el 26.54 % del área total, especialmente al sur de la cuenca donde se encuentran las zonas de mayor pendientes y geoformas que se predisponen para la ocurrencia de dicho fenómeno, además en las zonas donde se presentan afloramientos de la roca Ksg (Formación Guadalupe) la comunidad extrae el material de la roca para adecuar la vía y el suelo residual para la construcción de viviendas aprovechando el comportamiento arenoso del suelo residual en la zona lo que provoca movimientos en masa superficiales en las canteras improvisadas y a los costados de las vías. Las áreas con amenaza media ocupan la mayor parte de la cuenca con el 42.11 % del área total distribuido desde la parte alta hasta la parte baja de la cuenca, asociado a zonas con pendientes moderadas y menores, por otro lado geomorfológicamente el área se caracteriza por la presencia de pequeños montículos y ondulaciones de origen denudacional (Dmo) asociadas a perfiles de meteorización de KPgs (Formación Seca) . Las áreas con amenaza abaja ocupan

el 31.35 % del área total, caracterizado por la presencia de pendientes suaves y planas. El polígono del antiguo ETCR La Fila, presenta zonas con amenaza media y baja. La amenaza media se concentra hacia las zonas más altas.

# 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.
- Atkinson, P., y Massari, R. (1998). Generalized linear modelling of susceptibility to landsliding in the central apennines, italy. *Computers & Geosciences*, 373–385.
- 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.
- Ayalew, L., y Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko mountains, central Japan. *Geomorphology*, 65(1-2), 15–31.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., y Ugawa, N. (2004). Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. *Landslides*, 1(1), 73–81.
- 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).
- Brenning, A. (2005). Spatial prediction models for landslide hazards: review, comparison and evaluation.
- 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.
- Colombiano-SGC, S. G. (2017). *Guía metodológica para zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1: 25.000*. Bogotá.
- 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.
- Fawcett, T. (2006). An introduction to roc analysis. *Pattern recognition letters*, 27(8), 861–874.
- Gilabert, 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. (1995). *ESTUDIO PRELIMINAR DEL DESLIZAMIENTO DEL SILENCIO MUNICIPIO ICONONZO-DEPARTAMENTO DEL TOLIMA. Pages 1-31*. Santafé de Bogotá.
- INGEOMINAS. (2002). *Compilación Geológica y Fotogeología de la plancha 265 Icononzo. Escala 1:100.000.*, 1–84.
- 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.
- Lee, S., y Pradhan, B. (2007). Landslide hazard mapping at selangor, malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, 4(1), 33–41.
- 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.
- Municipio de Icononzo. (2007). Esquema de Ordenamiento Territorial. , 2007(Enero 29), 39.
- 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>
- Ozdemir, A., y Altural, T. (2013). A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan mountains, sw turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 64, 180–197.
- 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*.
- 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, 2014a).

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

Se realiza la búsqueda y análisis de información secundaria de estudios sobre inundaciones para susceptibilidad en el área de estudio teniendo en cuenta la disponibilidad y calidad de la información, se encontró la siguiente fuente.

- Memoria descriptiva mapas de inundación departamento de Tolima escala 1:100000 evento La Niña años 1988-2000-2011-2012 (IDEAM, 2014b): durante los años 2010-2011-2012 Colombia experimentó unas condiciones de inundación asociadas con la ocurrencia del evento La Niña. El IDEAM para el departamento de Tolima generó los mapas de inundación que mostró

eventos en zonas que no colindan al municipio de Icononzo, dentro del municipio no se registraron eventos de inundación asociados a La Niña según la escala en la que se hizo el estudio.

## **9.2. Definición del área de influencia para la evaluación de inundaciones**

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 y Bejarano (1997).

El zona de estudio comprende tres cuencas (Figura 126) denominadas cuenca La Laja con una extensión de 1620,9 ha (Figura 126A) que es controlada morfológicamente por la quebrada La Laja, cuenca Mogollas con una extensión de 211,9 ha (Figura 126B) controlada por la quebrada Mogollas y la cuenca La Lajita con una extensión de 306,17 ha (Figura 126C) que cuenta con varias corrientes de agua dominantes que le dan forma al terreno, todas ellas controladas por las corrientes de agua predominantes en la región.

## **9.3. Catalogo histórico de eventos**

La realización del inventario histórico por inundaciones, toma como base de datos los registros disponibles para el municipio de Icononzo en las plataformas del Sistema de Inventario de Desastres (DesInventar) (Sección 8.4.1), con el fin de dar una mirada en la morfodinámica regional asociada al antiguo ETCR La Fila. Durante el periodo comprendido entre 1984 y el primer semestre del año 2013, el municipio de Icononzo registró en el catálogo del DesInventar un total de 9 eventos de inundación, algunos se han presentado en el río Sumapaz. Estos representan el evento de mayor frecuencia de ocurrencia en el municipio con el 52,9% de los reportes (teniendo en cuenta solo eventos tipo movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales) y han dejado como saldo 742 personas afectadas.

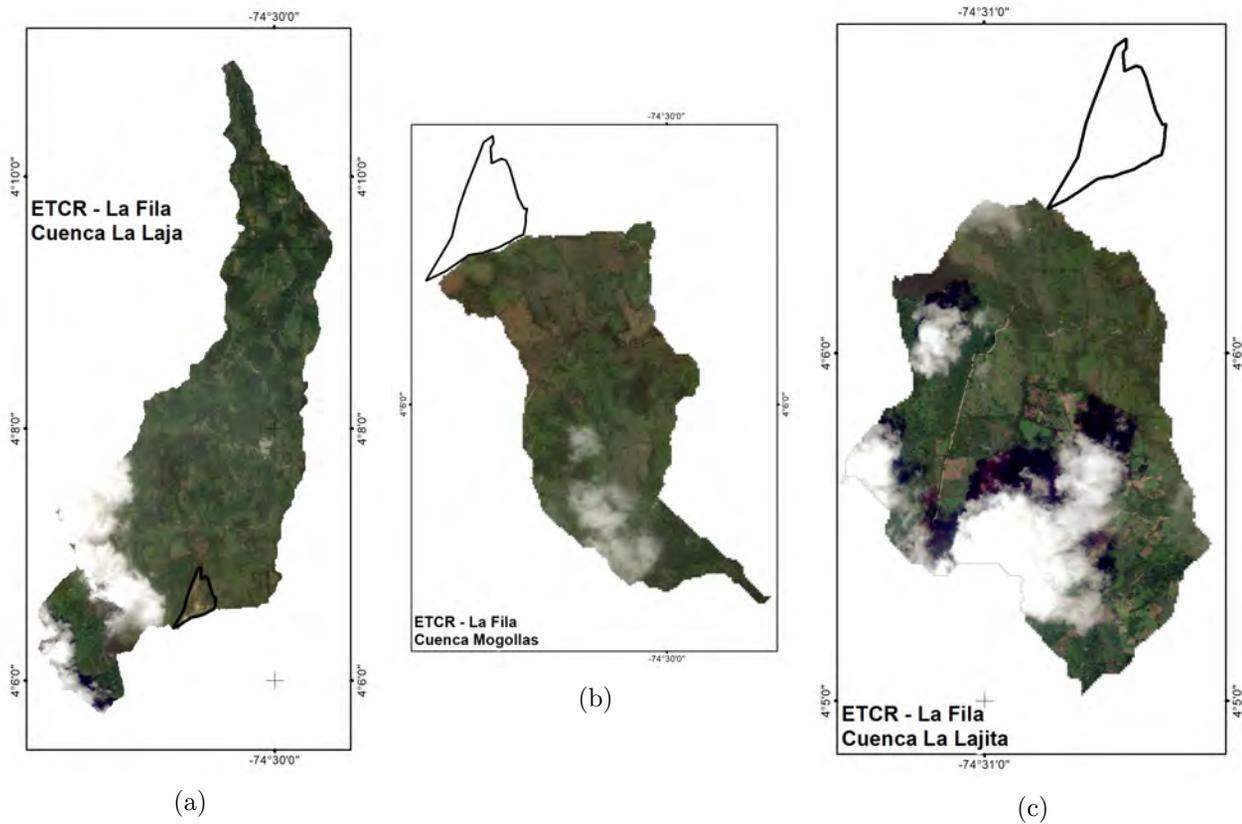


Figura 126: Cuencas La Fila

## 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

Los valores de tiempo de concentración estimados para el antiguo ETCR se

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]
Giannodotti	$T_c = \frac{4\sqrt{A+1,5L}}{25,3\sqrt{S \cdot L}}$	$T_c$ : 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]

presentan en la Tabla 51.

Tabla 51: Tiempos de concentración

ETCR	Cuenca	Tiempo de Concentración [minutos]						
		Témez	Kirpich	California	Passini	Giandotti	Clark	tc
La Fila	La Laja	198,29	72,82	69,60	131,85	80,72	218,51	128,63
	Mogollas	59,23	18,08	17,43	27,34	31,35	50,43	33,98
	La Lajita	54,35	17,88	14,46	35,06	43,44	70,49	39,28

### 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 127, 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 las diferentes zonas de interés se muestran posteriormente en la Figura 128.

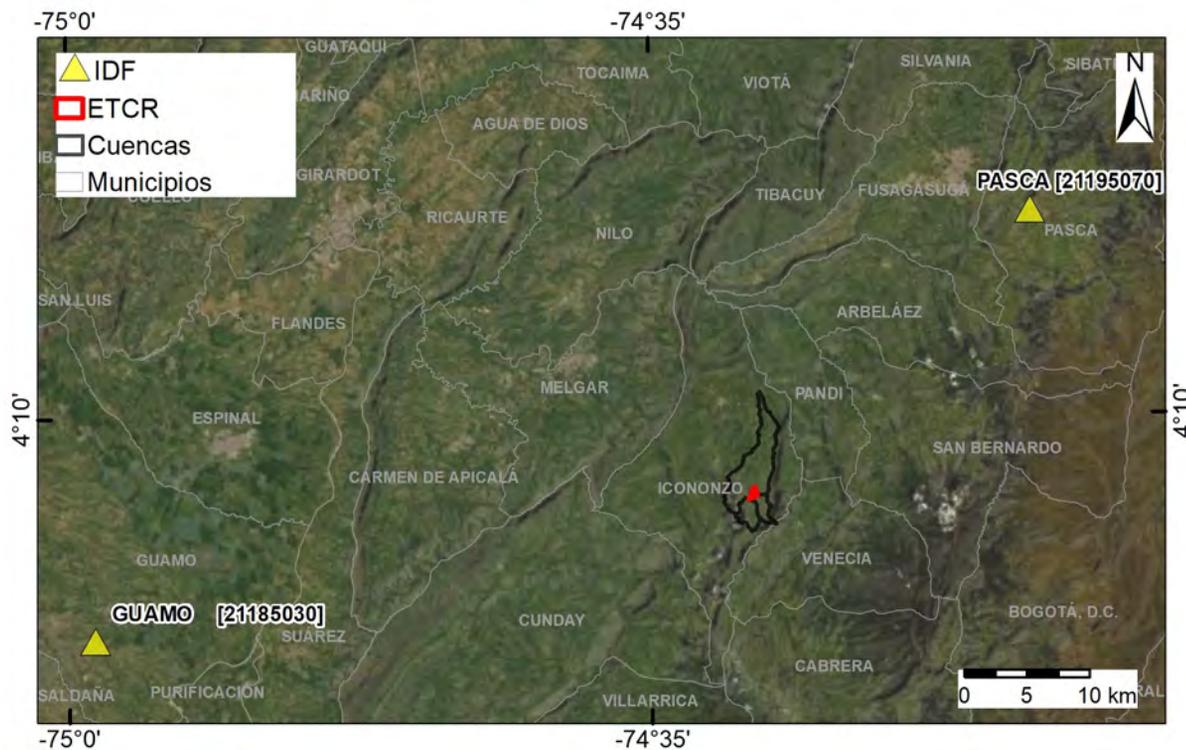


Figura 127: Ubicación de Estaciones pluviográficas

### 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 129.

El histograma de lluvia distribuida para período de retorno de 100 años se presenta a manera de ejemplo en la Figura 130 para la Cuenca La Laja.

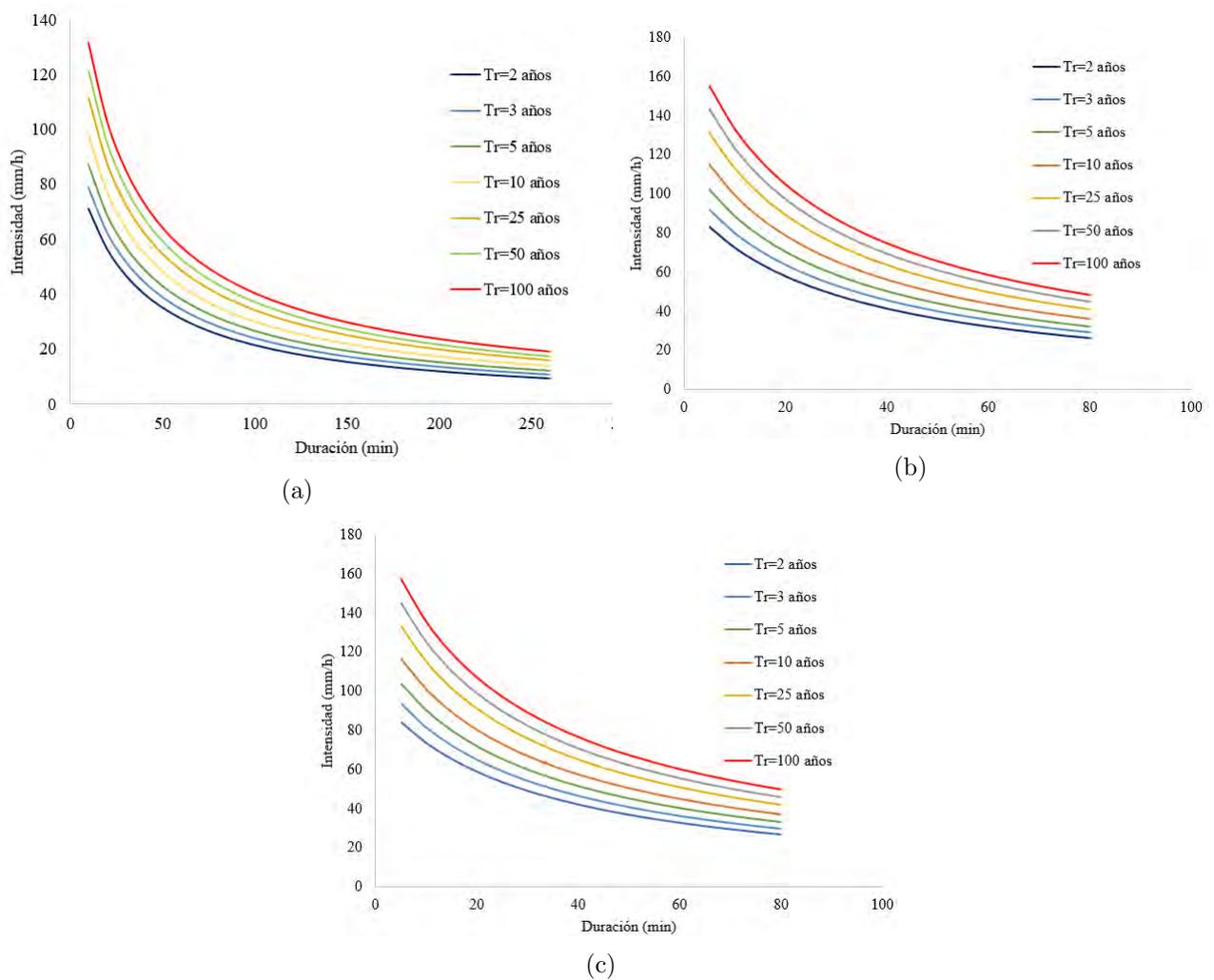


Figura 128: Curvas IDF: (a) Cuenca La Laja, (b) Cuenca Mogollas y (c) Cuenca La Lajita

#### 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 ( $Ia$ ) para representar el agua que no es susceptible de ser 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

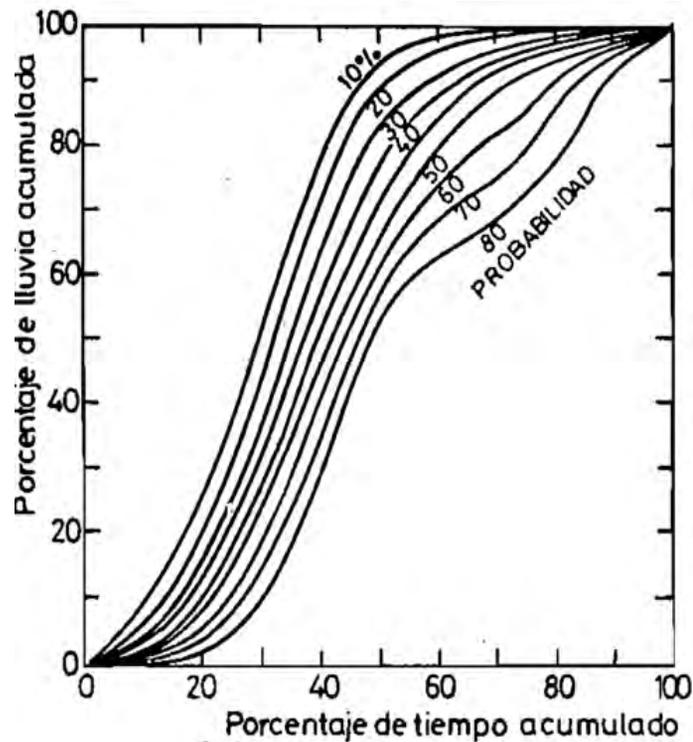


Figura 129: Diagrama de Huff para grupo de tormentas II

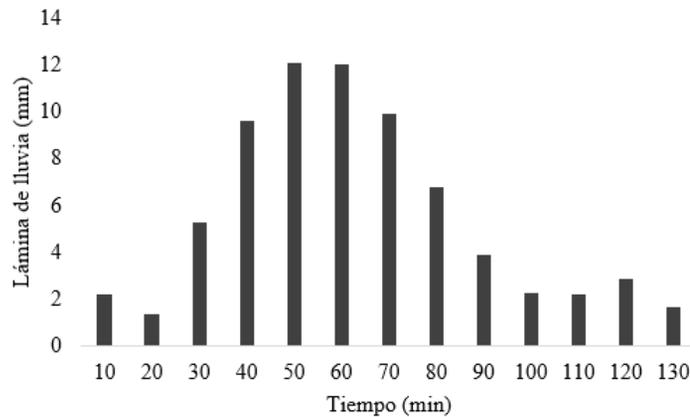


Figura 130: Hietograma de precipitación de diseño Cuenca La Laja Tr=100 años

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 y 54 se presenta el valor ponderado del número de curva  $CN$  para las cuencas La Laja, Mogollas y La Lajita respectivamente y en la Tabla 55 se presenta el valor del coeficiente de infiltración y abstracción inicial del suelo para el antiguo ETCR.

Tabla 52: Estimación del número de curva de la cuenca La Laja

<b>Cuenca La Laja</b>			
Cobertura	Área [Km <sup>2</sup> ]	% Área	CNII
Urbano	0,078	0,48	90
Bosque	14,976	92,44	70
Pastos	1,139	7,03	74
Suelo desnudo	0,008	0,05	82
CNII Ponderado			70

Tabla 53: Estimación del número de curva de la cuenca Mogollas

<b>Cuenca Mogollas</b>			
Cobertura	Área [Km <sup>2</sup> ]	% Área	CNII
Urbano	0,002	0,08	90
Pastos	0,097	4,60	74
Bosque	2,017	95,32	70
CNII Ponderado			70

Tabla 54: Estimación del número de curva de la cuenca La Lajita

<b>Cuenca La Lajita</b>			
Cobertura	Área [Km <sup>2</sup> ]	% Área	CNII
Bosque	2,650	86,57	70
Pastos	0,411	13,43	74
CNII Ponderado			71

Tabla 55: Parámetros de pérdidas por infiltración

Antiguo ETCR	Cuenca	Ia [mm]	$\phi$ [mm/h]
La Fila	La Laja	21,38	10,00
	Mogollas	21,56	10,00
	La Lajita	21,22	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 56, 57 y 58 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 56: Caudales máximos para diferentes tiempos de retorno de la cuenca La Laja

Cuenca La Laja								
Tr [años]	2	3	5	10	25	50	100	500
QMáx [m <sup>3</sup> /s]	18	26,6	37,1	50,3	68	81	94,6	126,06

Tabla 57: Caudales máximos para diferentes tiempos de retorno de la cuenca Mogollas

Cuenca Mogollas								
Tr [años]	2	3	5	10	25	50	100	500
QMáx [m <sup>3</sup> /s]	2,9	5,5	8,9	13,1	18,5	22,4	26,5	36,3

Tabla 58: Caudales máximos para diferentes tiempos de retorno de la cuenca La Lajita

Cuenca La Lajita								
Tr [años]	2	3	5	10	25	50	100	500
QMáx [m <sup>3</sup> /s]	6,10	9,90	14,40	20,10	27,30	32,60	38,10	51,41

### 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 del caudal máximo con período de retorno de 500 años. 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 131 se ilustra la obtención del HAND Rennó y cols. (2008).

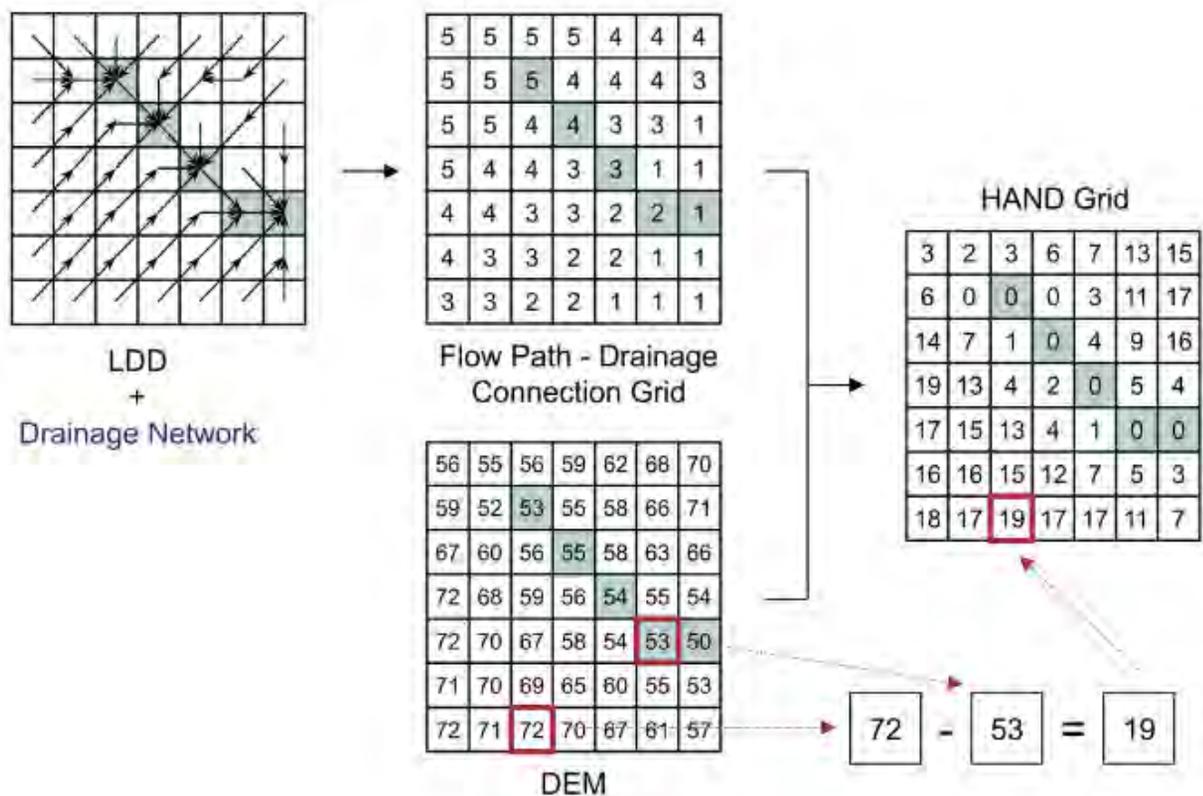


Figura 131: Descripción HAND, fuente: (Rennó y cols., 2008)

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:

$$H = 0,517Q^{0,335} \quad \text{Ríos de montaña} \quad (9.3)$$

A continuación, en las Figuras 132, 133 y 134 se presenta el descriptor geomorfológico HAND para las cuenca La Laja, Mogollas y La Lajita respectivamente. En la Figura 135 el calado resultante de la distribución del caudal máximo distribuido en la red de drenaje a manera de ejemplo en la cuenca La Laja para 500 años de período de retorno.

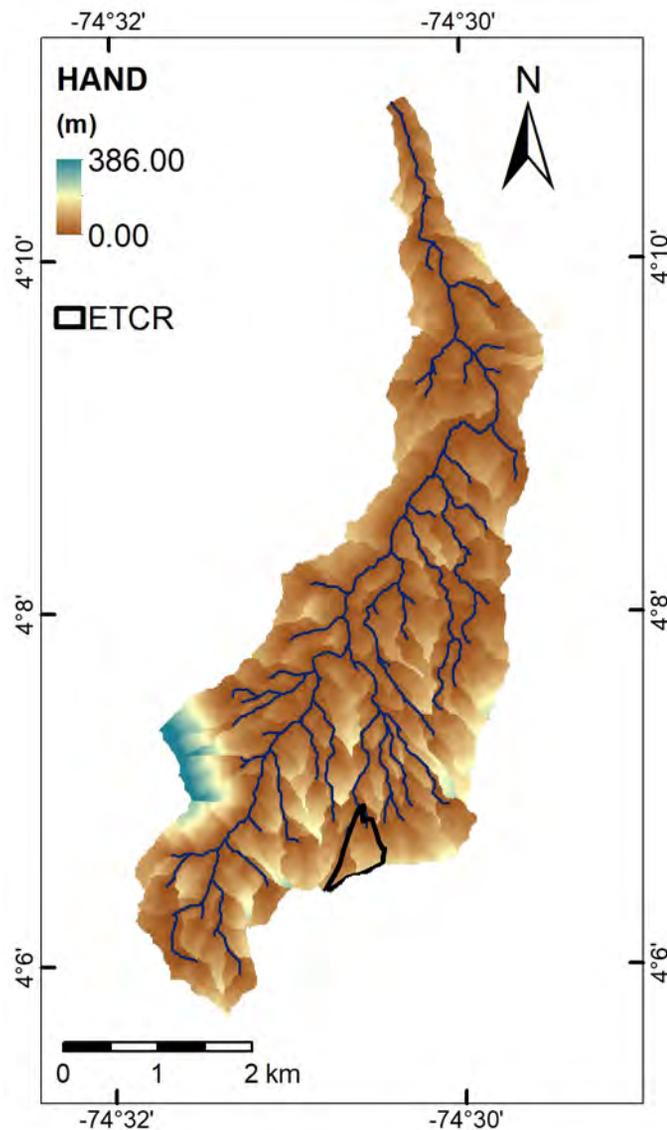


Figura 132: HAND cuenca La Laja

Con el fin de definir los diferentes niveles de amenaza se establecen las zonas

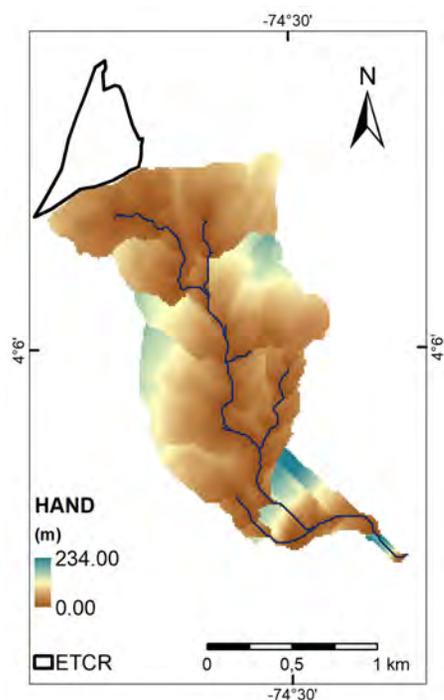


Figura 133: HAND cuenca Mogollas

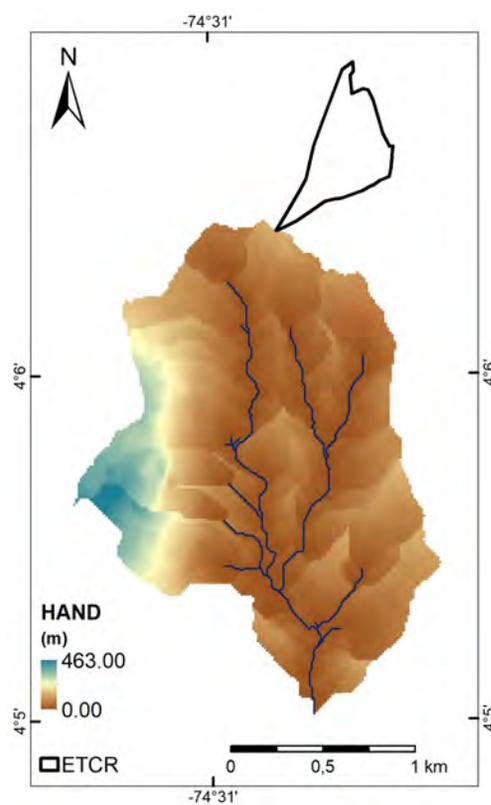


Figura 134: HAND cuenca La Lajita

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 136 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.

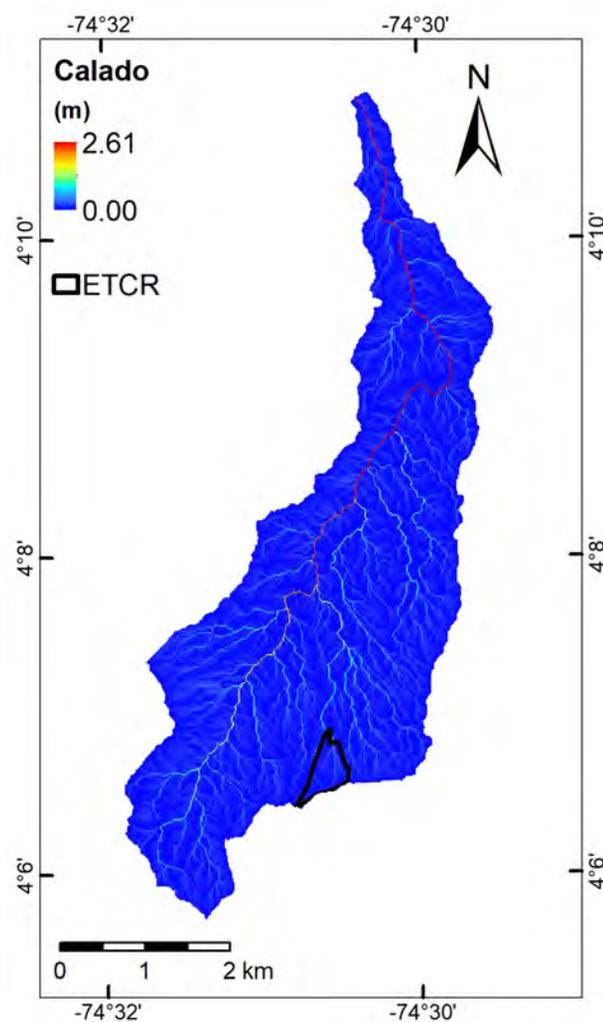


Figura 135: Ejemplo - calado cuenca La Laja

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

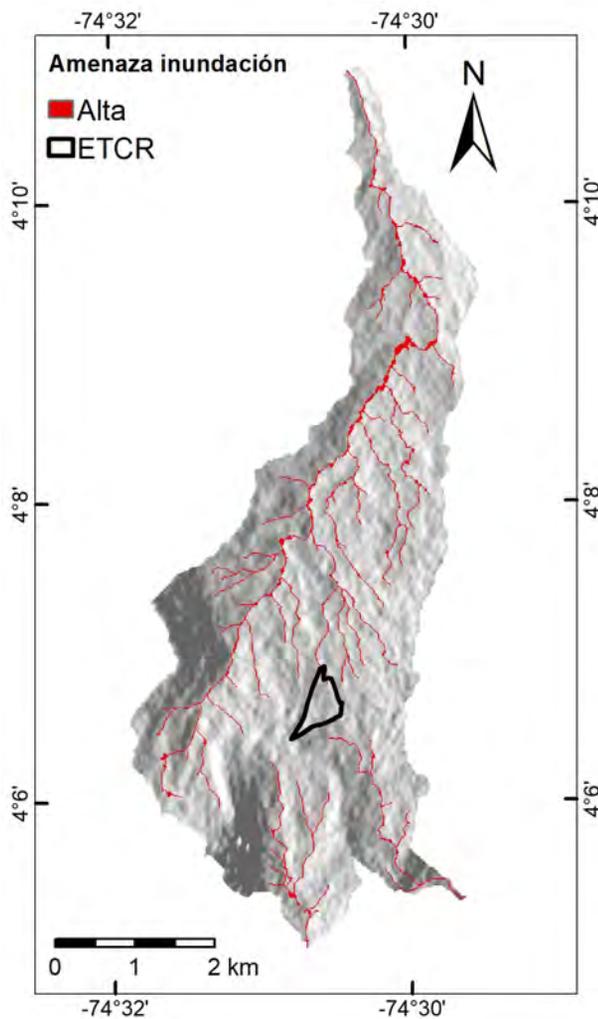


Figura 136: Zonificación de amenaza por inundación

metodología frente a la escala de trabajo, por su parte el antiguo ETCR no 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. (2014a). Estudio Nacional del Agua 2014.
- IDEAM. (2014b). MEMORIA DESCRIPTIVA MAPAS DE INUNDACIÓN DEPARTAMENTO DE TOLIMA Escala 1:100.000. *Memoria descriptiva mapas de inundación departamento de Tolima 1:100.000*(96), 27.
- Lage, A. F. t., y Bejarano, M. S. (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 Viane 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*.
- Smith, R., y Vélez, M. V. (1997). *Hidrología de Antioquia*. Medellín.
- USACE. (2016). Hydrologic Engineering Center, Hydrologic Modelling System HEC-HMS. User's Manual (ver- sion 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 montañana, 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 137). 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.

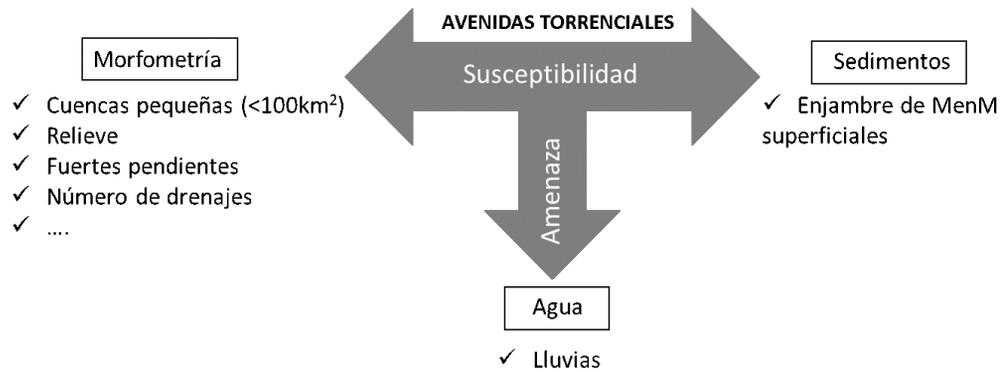


Figura 137: Diagrama conceptual de la evaluación de la amenaza por avenidas torrenciales.

### 10.1. 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 La Fila, lo que permite tener un acercamiento regional al área de interés, frente a la amenaza por avenidas torrenciales. En la Figura 138 se presentan las dos cuencas establecidas. El drenaje de la cuenca A es un drenaje tributario de la cuenca B cuyo drenaje principal corresponde a la quebrada Chimiadó, siendo solo el 4,7 % del área de la Figura.

### 10.2. Catalogo histórico de eventos

La realización del inventario histórico por avenidas torrenciales, toma como base de datos los registros disponibles para el municipio de Icononzo en las plataformas del Sistema de Inventario de Desastres (DesInventar) (Sección 8.4.1), con el fin de dar una mirada en la morfodinámica regional asociada al antiguo ETCR La Fila. Durante el periodo comprendido entre 1922 y el primer trimestre del año 2015, el municipio de Icononzo registra en el catálogo del DesInventar, un total de 3 eventos clasificados como avenidas torrenciales, en quebradas como La María, La Siria, La Limonada y Santa Inés. Este tipo de eventos representa el 17,6 % de los reportes en el municipio (teniendo en cuenta

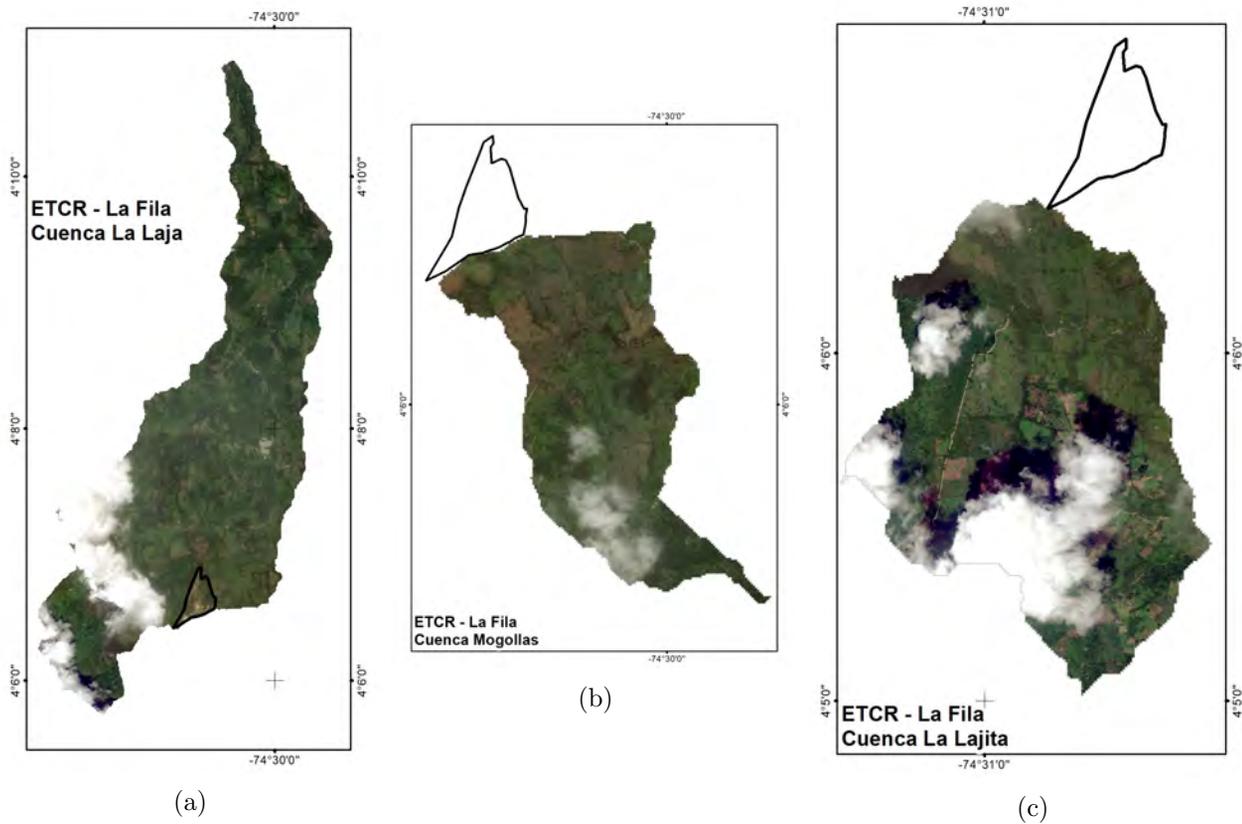


Figura 138: Cuencas La Fila

solo eventos tipo movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales), que han ocasionando la muerte a una persona y dejado afectadas a 300 personas.

### 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, estos relacionados con los drenajes, la geometría y forma de la cuenca, así como de su textura y las características del relieve. En la Tabla 66 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 (Su).** 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  $R_l$  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”.  $R_l$  tiene un rango de  $1,5 \leq R_l \leq 3,5$  (Huanca, 1999).

**Relación de bifurcación ( $R_b$ ).**

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  $3 \leq R_b \leq 5$  (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 RB . 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 Rb y Rl. Rb es inversamente proporcional a  $\rho$ , es decir, entre más grande sea el valor de Rb, menos elevado será el valor de  $\rho$ . Además Rb tiene un rango de resultados para cuencas naturales  $3 \leq RB \leq 5$ . Así pues, se puede decir que si el valor de Rb es próximo a 3 entonces  $\rho$  tendrá un valor elevado y por el contrario si Rb 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 (Lb).** 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 59 representa una clasificación del Ff asociado a una cuenca.

Tabla 59: 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

**Coefficiente 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 60 muestra tres categorías para la clasificación, de acuerdo con este parámetro:

Tabla 60: Características de la cuenca de acuerdo con el valor de Cc.

Clase de Forma	Índice 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  $\text{km}^2$ . 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 61 se categoriza el  $F_s$  según el valor resultante (Somashekar, Ravikumar, Sowmya, Dar, y Ravikumar, 2011).

Tabla 61: Características de la cuenca de acuerdo con el valor  $F_s$

<b><math>F_s</math></b>	<b>N° Drenajes / <math>\text{Km}^2</math></b>
Bajo	0 - 5
Moderado	5 - 10
Moderado - Alto	10 - 15
Alto	15 - 20
Muy Alto	20 - 25

**Densidad de Drenaje ( $D_d$ ).** Su cálculo consiste en dividir la longitud 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 62 describe las magnitudes dadas para los rangos de  $D_d$ .

Tabla 62: Características de la cuenca de acuerdo con el valor  $D_d$

<b><math>D_d</math></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 63 categoriza los resultados de Lg, 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 63: Características de la cuenca de acuerdo con el valor Lg

<b>Lg</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 64 representa los atributos dados para el número de robustez.

Tabla 64: 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 65 permite identificar el proceso

hidrogeomorfológico asociado al índice de Melton.

Tabla 65: 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 139).

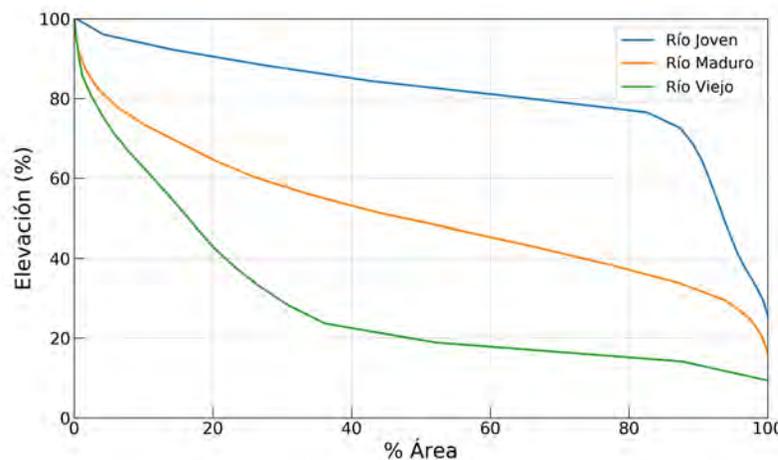


Figura 139: Cambio de forma de la curva hipsométrica con la edad del río. Fuente: Elaboración propia

**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 66: 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 67, se presentarán los resultados de los índices morfométricos obtenidos, correspondientes a las cuencas del antiguo ETCR La Fila.

Las Figuras 140, 141, 142, 143, 144 y 145 presentan los resultados obtenidos para la curva hipsométrica, perfil longitudinal e histograma altimétrico.

Tabla 67: Índices morfométricos para la evaluación de la torrencialidad de las Cuencas del antiguo ETCR La Fila-Icononzo

	Parámetro	Símbolo	La Laja	Mogollas	La Lajita
Red de Drenaje	Orden de la cuenca	Su	5	3	4
	Longitud del cauce principal (km)	C1	12,650	3,212	2,86
	Número total de corrientes	Nu	510	69	76
	Longitud total de las corrientes (km)	Lu	92,359	11,641	16,04
	Relación de bifurcación	Rb	1,745	1,589	2,71
	Relación de longitud	Rl	1,796	1,505	2,52
	Coefficiente $\rho$	$\rho$	1,03	0,9	0,93
Geometría y forma de la cuenca	Longitud máx de la cuenca (km)	Lb	9,454	2,723	2,66
	Área (km <sup>2</sup> )	A	16,2	2,119	3,06
	Perímetro (km)	P	32,670	10,229	10,15
	Factor forma	Ff	0,18	0,286	0,43
	Relación de elongación	Re	0,480	0,603	0,74
	Relación de circularidad	Rc	0,19	0,25	0,37
	Coefficiente de compacidad	Cc	2,3	2,0	1,62
	Relación de textura	Rt	7,958	3,422	3,94
	Relación de aptitud	Rf	0,387	0,314	0,28
	Relación wandering	Rw	1,34	1,18	1,07
Textura de las corrientes	Frecuencia de flujo	Fs	31,481	32,562	24,823
	Densidad de drenaje	Dd	5,70	5,49	5,24
	Constante de mantenimiento del canal	C	0,175	0,182	0,191
	Intensidad de drenaje	Di	5,522	5,92	4,74
	Número de infiltración	If	179,481	178,876	130,043
	Coefficiente de torrencialidad	Ct	16,049	16,517	13,065
	Longitud del flujo terrestre (km)	Lg	0,088	0,091	0,095
Características del relieve	Relieve	H	1,199	0,716	0,616
	Pendiente media de la cuenca (°)	S	12,049	12,172	16,279
	Relación del relieve	Rh	0,127	0,263	0,231
	Número de robustez	Rn	6,836	3,933	3,227
	Índice de Melton	M	0,298	0,492	0,352

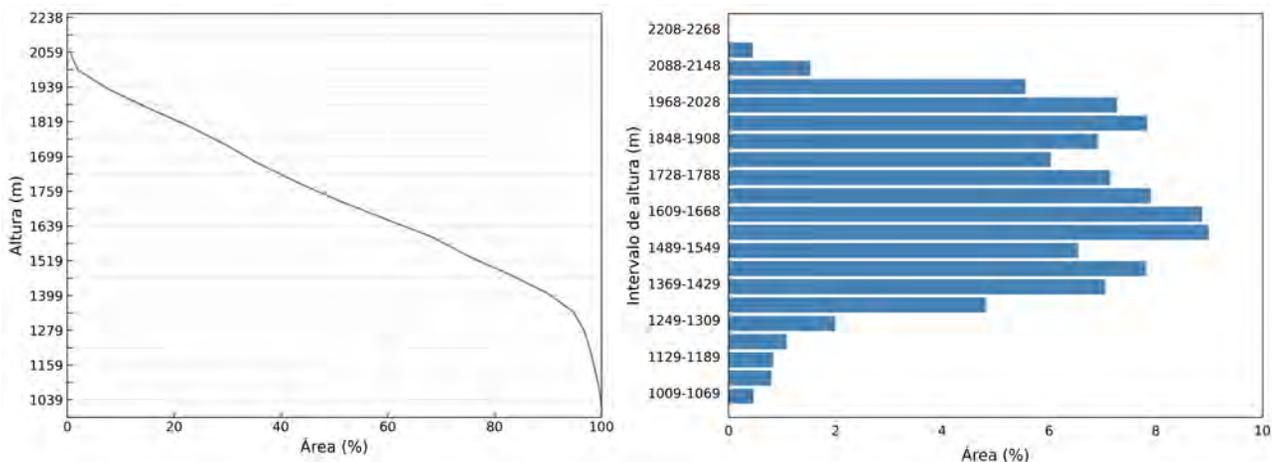


Figura 140: Curva hipsométrica e histograma altimétrico de la Q. La Laja.

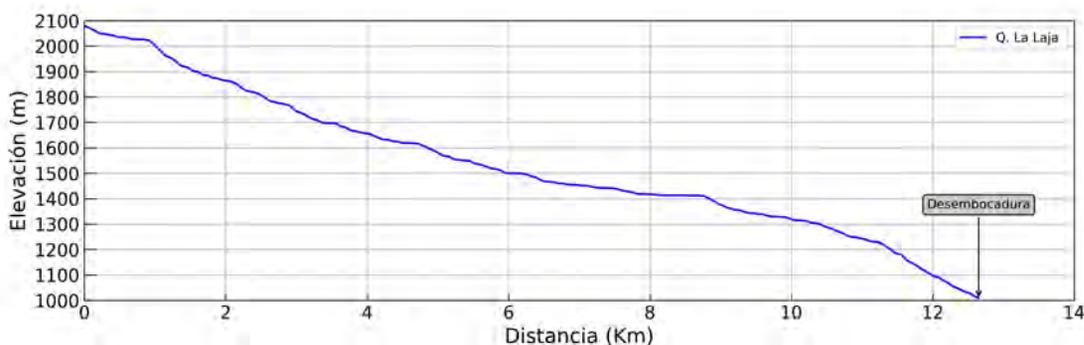


Figura 141: Perfil longitudinal de la Q. La Laja

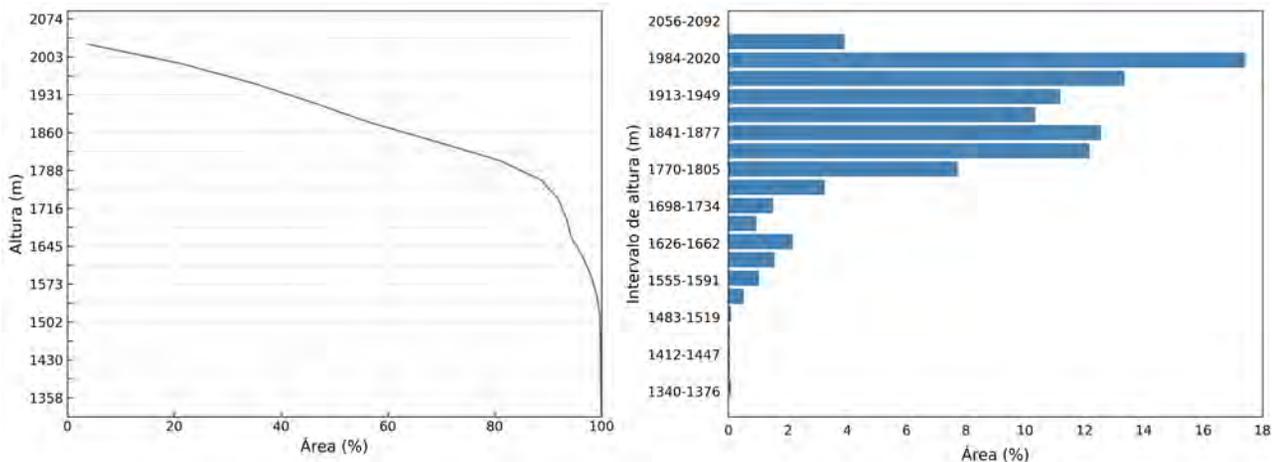


Figura 142: Curva hipsométrica e histograma altimétrico de la Q. Mogollas

Los índices morfométricos corresponden a la aplicación de ciertos procedimientos basados en valores numéricos, a través del estudio de la morfología

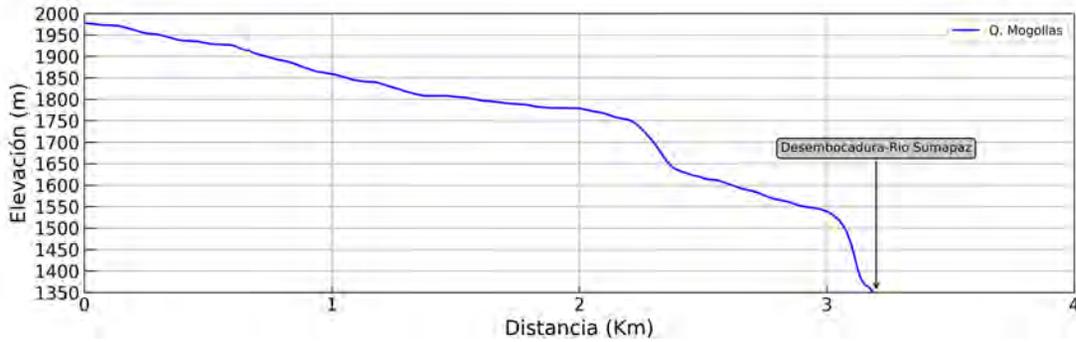


Figura 143: Perfil longitudinal de la Q. Mogollas.

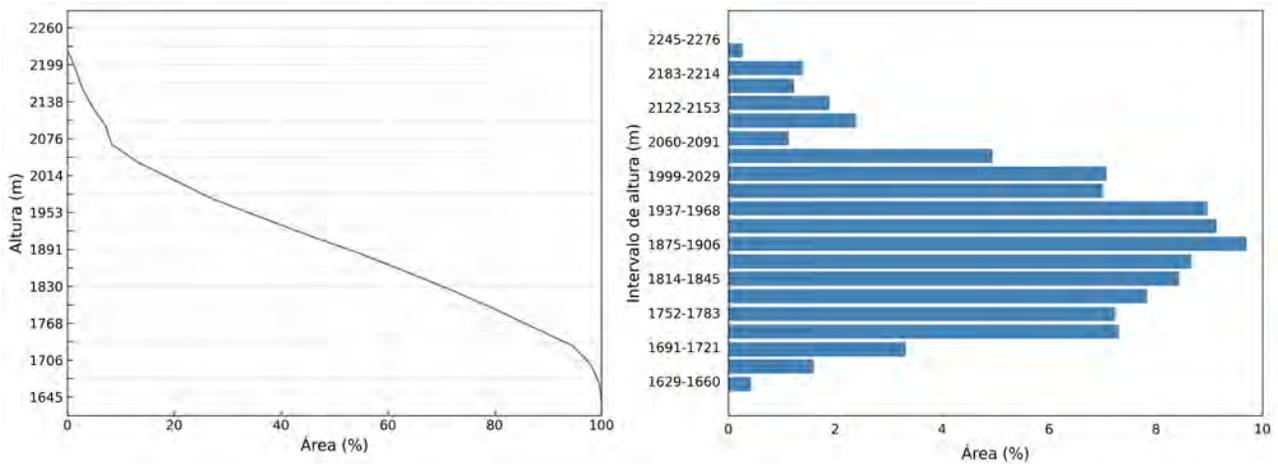


Figura 144: Curva hipsométrica e histograma altimétrico de la Q. La Lajita

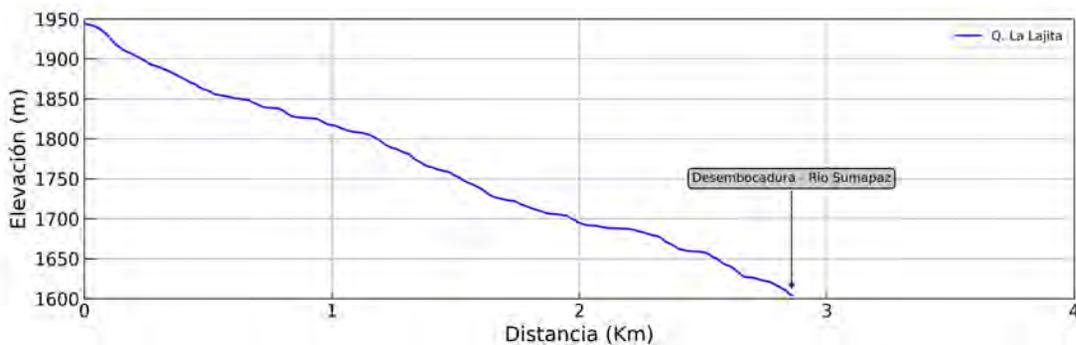


Figura 145: Perfil longitudinal de la Q. La Lajita.

y geomorfología de la zona para entender el comportamiento de las cuencas hidrográficas y el entendimiento de todo su régimen hidrológico.

Los mayores ordenes de drenaje para la Cuenca de la Q. La Laja son el 4 y el 5, y en términos de la longitud total de los drenajes el de orden 1 lidera con un total de aproximadamente 48,376 km, La Laja presenta una relación

de bifurcación de 1,745 que es un valor cercano a dos, estos valores suelen corresponder a cuencas de menor pendiente y este tipo de valores bajos suelen presentar más riesgos de inundación por concentración brusca de la escorrentía. El Coeficiente  $\rho$  muestra valores altos esto sugiere un mayor almacenamiento hidrológico durante las inundaciones y la reducción de los efectos de la erosión durante una descarga elevada.

El factor forma asociado a la geometría de la cuenca se presenta con valores por debajo de 0,22 lo que corresponde a "Muy Alargada", para cuencas muy alargadas el tiempo de viaje del agua es mayor y los picos de las crecidas son menos súbitos. La relación de elongación tiene un rango de 0,6 que se asocia a cuencas con relieves pronunciados. La Relación de circularidad se presenta como un valor cercano a uno lo que corresponde a una morfología alargada. La cuenca presenta un coeficiente de compacidad de Clase 3 lo que la clasifica como Oval-Oblonga a Rectangular-Oblonga. La cuenca presenta una relación de textura moderada.

Redes de drenajes densas tienden a tener índices de drenaje altos, para La Laja la frecuencia corresponde a un valor de 31,481 considerado en un rango de "Muy Alto" lo cual conduce a mayor velocidad en la evacuación de las aguas. La densidad de drenaje presenta un valor de 5,7 lo que corresponde a una cuenca bien drenada, con un buen potencial erosivo respondiendo bien ante un eventual evento torrencial de gran dimensión. La constante de mantenimiento de canal es de 0,175 por ser un valor menor a 3 refleja poca infiltración suelos menos resistentes a la erosión. Numero de infiltración con un valor de 179,481 .Altorefleja poca infiltración y mayor escorrentía. El coeficiente de torrencialidad asociado a la cuenca de la Q. La Laja es de 16,049 para este tipo de valores se considera una elevada susceptibilidad a la erosión y alta torrencialidad. El número de robustez es de 6,8 se puede clasificar como moderadamente alto lo que corresponde a zonas montañosas con altas precipitaciones. El índice de Melton presenta un valor levemente por debajo de 0,3 lo que la hace más propensa a un evento de transporte de sedimento por inundación.

Las cuencas Mogollas y La Lajita desembocan en el Río Sumapaz y poseen Áreas pequeñas de 2 y 3 km<sup>2</sup>, respectivamente. La cuenca Mogollas presenta una relación de bifurcación de 1,58 que se considera baja y se asocia a una concentración mayor de la escorrentía. La Lajita posee una relación de Bifurcación de 2,71 se asocia con áreas de pendientes fuertes con picos de crecida poco importante. El Coeficiente  $\rho$  para la Cuenca La Lajita se considera un valor alto

esto sugiere un mayor almacenamiento hidrológico durante las inundaciones y la reducción de los efectos de la erosión durante una descarga súbitas.

El factor forma asociado a la cuenca Mogollas con un valor de 0,28 se presenta como Alargada, para cuencas alargadas el tiempo de viaje del agua es mayor por lo que los picos de crecidas son menos súbitos y la cuenca responde mejor a este tipo de eventos. El factor forma de la cuenca La Lajita se presenta como “Ni alargada, ni ensanchada” los picos de crecidas son menos súbitos y la cuenca responde de manera moderada a este tipo de eventos. La relación de elongación para la cuenca Mogollas y La Lajita corresponde a valores que se encuentran dentro de los parámetros asociados a cuencas con relieve pronunciado. La relación de circularidad para ambas cuencas Mogollas y La Lajita se presentan con valores cercanos a cero, lo que se asocia con cuencas alargadas. Para Mogollas y La Lajita se dio la caracterización de Clase 3, oval-oblonga a rectangular oblonga.

Los parámetros texturales de la cuenca Mogollas y La Lajita hacen parte del aspecto superficial de la red de drenaje, La frecuencia de drenaje para ambas cuencas corresponde a “Muy alto” lo cual conduce a mayor velocidad en la evacuación de las aguas y mejor control en la escorrentía, La densidad de la red de drenaje para las cuencas Mogollas y La Lajita tienen un parámetro alto, mayor a 3 , que se asocia a cuencas bien drenadas con un buen potencial erosivo, respondiendo bien ante un eventual evento torrencial de gran dimensión. La constante de mantenimiento del canal presenta valores menores a 3 lo que refleja poca infiltración y suelos menos resistentes a la erosión. El coeficiente de torrencialidad para la cuenca Mogollas presenta un valor de 16,517 y para la cuenca La Lajita se presenta como 13,065, ambos valores son altos y su interpretación considera una elevada susceptibilidad a la erosión y alta torrencialidad. Los valores de número de robustez e índice de Melton para las cuencas Mogollas y La Lajita se presentan con valores altos asociados a regiones montañosas de altas precipitaciones y con altas posibilidades a presentar avenidas torrenciales de tipo flujo de escombros.

La curva hipsométrica, el perfil longitudinal, y el diagrama de frecuencias y altitudes se convierten en herramientas que aportan al entendimiento de los parámetros asociados al relieve. Con respecto a la curva hipsométrica La Cuenca La Laja presenta valores que la caracterizan como un río joven buscando un equilibrio, una zona con potencial erosivo. La Cuenca Mogollas se presenta como una cuenca joven, levantada con gran potencial erosivo. La Cuenca La

Lajita se presenta como un río maduro ni muy plano ni muy escarpado se encuentra en una zona de equilibrio. Con respecto al diagrama de frecuencias y altitudes para la Cuenca La Laja resalta el hecho de que la altura más frecuente se da en la cota 1579 y la mayoría de las alturas se dan en un rango de 1459 y 2058 m.s.n.m(metros sobre el nivel del mar) , las alturas más frecuentes para la Cuenca Mogollas y La Lajita fueron de 2002 m.s.n.m y 1891 m.s.n.m, Respectivamente. Para los histogramas se tuvo en cuenta un rango altitudinal de 20 clases . Los perfiles de todas las cuencas muestran algunas zonas de más alta pendiente, en especial el de la cuenca Mogollas que muestra pendientes más pronunciadas.

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 escorrentía 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 relieve 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 146 contiene los resultados obtenidos según los umbrales de Wilford y cols. (2004) para las cuencas del antiguo ETCR La Fila. A continuación se describen los datos utilizados para dichos umbrales y los resultados obtenidos:

- Para la cuenca de La Laja se tiene una longitud de cuenca de 9,45 km, siendo la más extensa de las tres cuencas que conforman el área de estudio del antiguo ETCR La Fila.
- El índice de Melton obtenido para La Laja es de 0,3 justo en el límite entre inundación e inundación de escombros.
- En la cuenca Mogollas la  $L_b$  es de 2,7 y el  $M$  de 0,49. Esto la ubica en una zona donde predominan los sedimentos y en la que, a pesar de no quedar exactamente en la zona de flujo, se ve muy relacionada con las cuencas torrenciales.
- La cuenca de La Lajita presenta una  $L_b$  de 2,6 y un  $M$  de 0,35. Esto la separa de la zona de inundación y la ubica con relación a una mayor

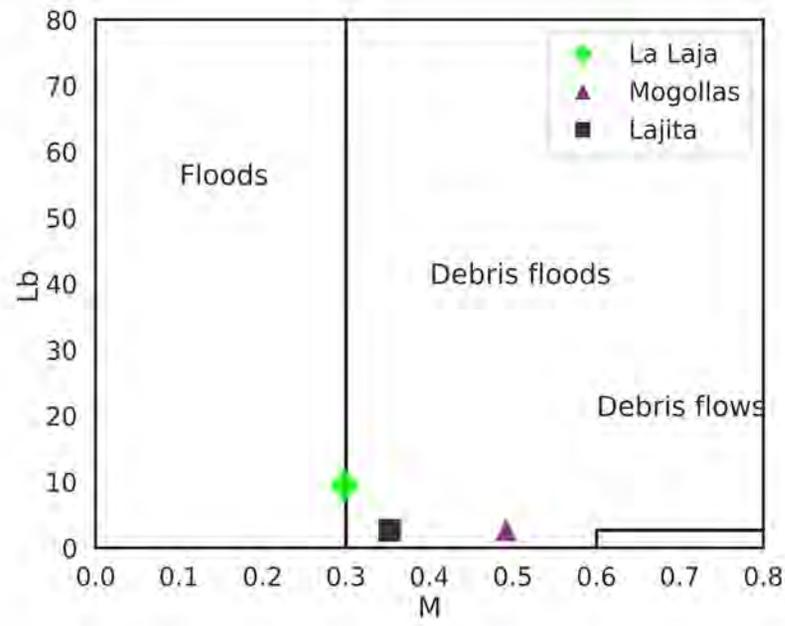


Figura 146: Umbrales de Wilford y cols. (2004) aplicados para el antiguo ETCR La Fila.

acumulación de sedimentos. Sin embargo no parece tener relación con el grupo de cuencas torrenciales, por lo que para esta cuenca, la representación por medio de los umbrales de Wilford no es muy diciente.

- En general los umbrales de Wilford y cols. (2004) no definen muy claramente la susceptibilidad torrencial de las cuencas para el antiguo ETCR La Fila, sin embargo se puede interpretar que la cuenca de La Laja es la que menos características torrenciales presenta.

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 147 representa las combinaciones de variables analizadas para la evaluación de la torrencialidad. A continuación se describen los datos analizados y los resultados obtenidos:

- En La Laja el Rh es de 0,13 el cual se encuentra en el intermedio de los

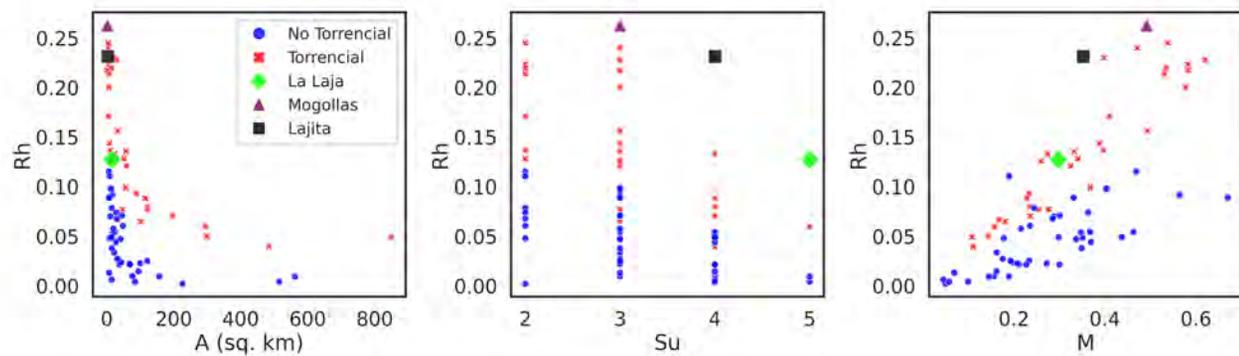


Figura 147: Comparación de variables con Rh para el ETCR La Fila.

grupos torrenciales y no torrenciales. Un área de 16,2 km<sup>2</sup> siendo la cuenca de mayor extensión en el antiguo ETCR La Fila.

- El orden Strahler en La Laja es de 5, ubicándola en una zona de cuencas torrenciales, debido a que las no torrenciales presentan valores inferiores de Rh para órdenes superiores. Sin embargo, el índice de Melton de 0,3 junto al Rh, a pesar de ubicar el punto en zona de cuencas torrenciales, no es tan evidente una preferencia hacia la susceptibilidad torrencial debido a su bajo M, por lo que no se podría concluir específicamente una capacidad de formar flujos, sino más bien inundaciones con bastante carga de sedimentos.
- En las cuencas Mogollas y Lajita, se obtuvieron relaciones de relieve superiores de 0,26 y 0,23 respectivamente, agrupándolas en la zona en la que predominan las cuencas torrenciales. El orden para estas cuencas es de 3 para Mogollas y 4 para Lajita, lo que demuestra una red hídrica medianamente configurada, ya que se tienen áreas de tan solo 2 y 3 km<sup>2</sup>.
- El índice de Melton para Mogollas es de 0,5 lo cual sumado a su alto Rh la ubican como una cuenca muy susceptible a eventos torrenciales, al igual que en Lajita que a pesar de presentar un M intermedio de 0,35, los resultados obtenidos para Rh y la calidad predictora de este parámetro, también la ubican como torrencialmente susceptible.

En conclusión las cuencas de Mogollas y Lajita se pueden considerar susceptibles a eventos torrenciales, resaltando a Mogollas como la que mayores características tiene para presentar dichos eventos. Mientras que para La Laja, no es posible concluir con exactitud la susceptibilidad, sin embargo, se debe

considerar una alta acumulación de sedimentos que descartan la posibilidad de presentar inundaciones sin carga para esta cuenca.

### **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.

En las Figuras 148, 149 y 150 se presentan la amenaza por movimientos en masa superficiales según las condiciones de estabilidad para cada escenario de lluvia.

A partir de los resultados para las distintas intensidades de lluvia se observa que las condiciones de mayor inestabilidad se concentran en las zonas de mayor inclinación de las laderas ubicadas en el costado SW de la cuenca Q. La Laja, en el cual se han identificado algunos movimientos en masa activos a partir del inventario de procesos morfodinámicos. 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.

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 cuenca de la quebrada La Laja presentada en las Figuras 148 a 150 para simular estas intensas precipitaciones concentradas en la parte más alta de la cuenca. Y con estos volúmenes se procede a simular las manchas de avenidas torrenciales.

## **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 (Díez Herrero, 2008), (Borga y cols., 2014). Por lo que es necesario, cuando se tienen cuencas hidrográficas con las características de

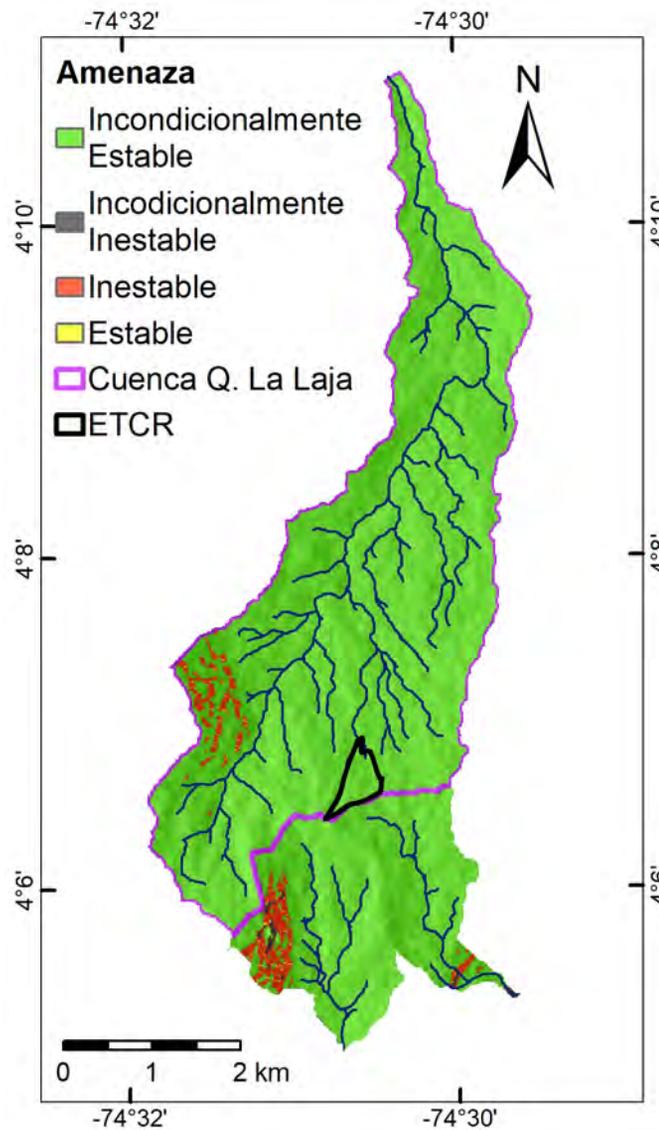


Figura 148: Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 10 años.

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 68 se presentan los volúmenes de material sólido y líquido asociados a cada período de retorno.

La zonificación de amenaza por avenida torrencial se define a partir de los

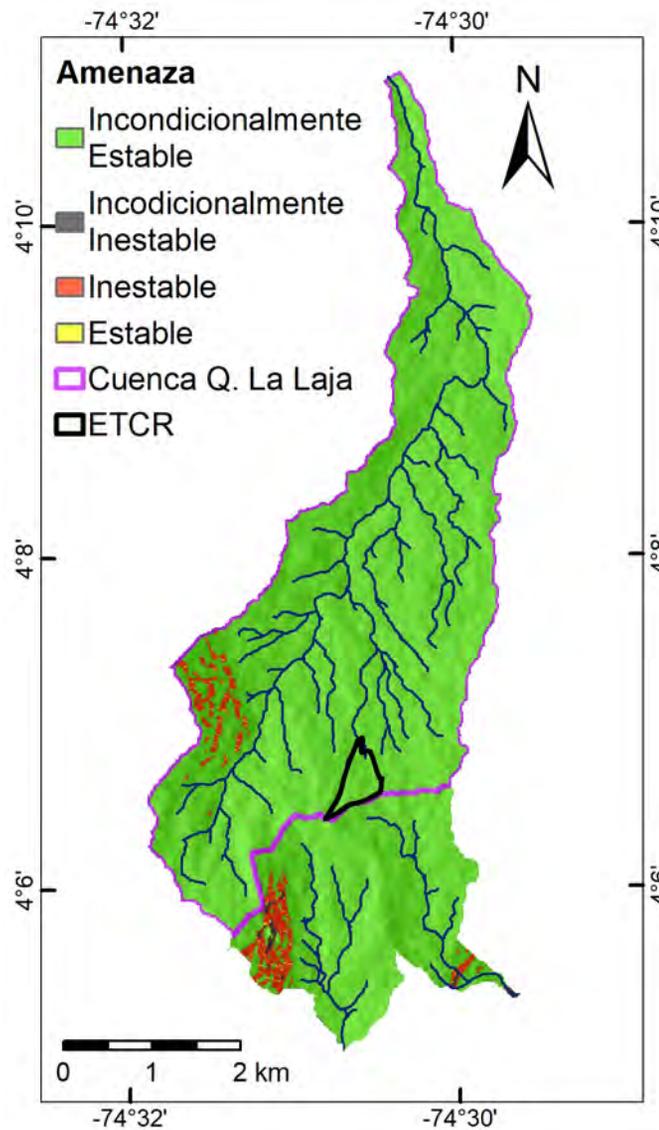


Figura 149: Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 100 años.

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 151 para el área de estudio del presente 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 escala se procede a presentar la mancha ante avenidas torrenciales en amenaza alta.

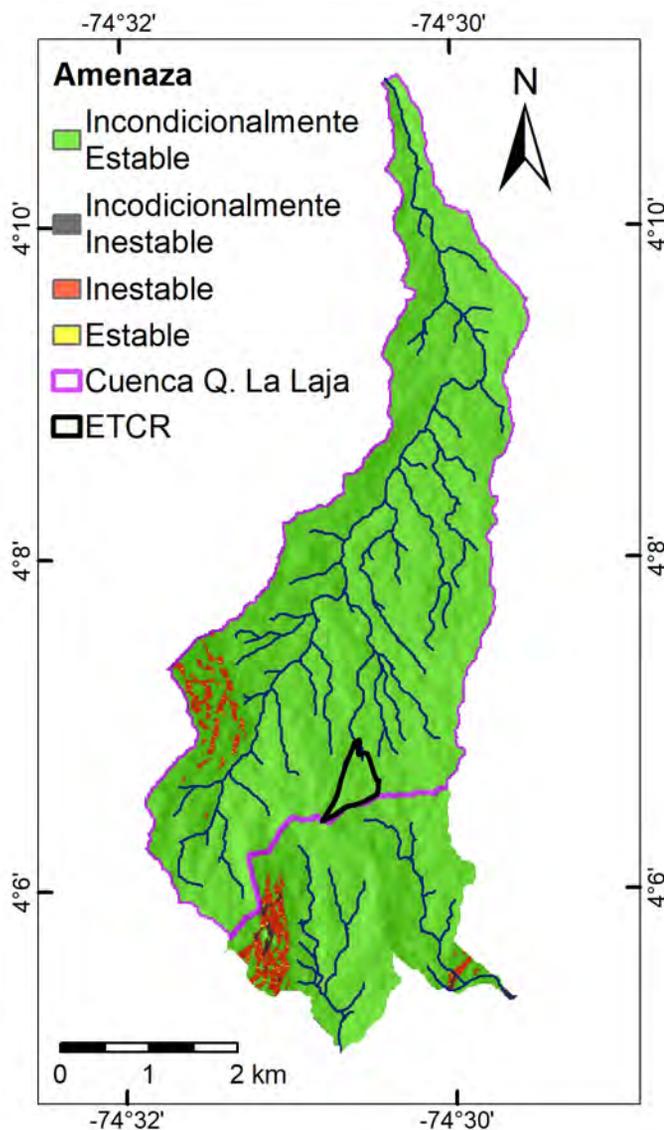


Figura 150: Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 500 años.

Tabla 68: Cálculo de caudal total para avenidas torrenciales

Cuenca La Laja			
Tr (años)	10	100	500
Volumen sólido (m <sup>3</sup> )	50,3	94,6	126,1
Caudal líquido (m <sup>3</sup> /s)	278,9	499,7	658,2
Tc (min)	130		
Volumen líquido (m <sup>3</sup> )	392340,0	737880,0	983278,8
Volumen total (m <sup>3</sup> )	813928,9	1201213,8	1470623,4
% Líquido	48,2	61,4	66,9
% Sólido	51,8	38,6	33,1
Caudal total (m <sup>3</sup> /s)	104,3	154,0	188,5

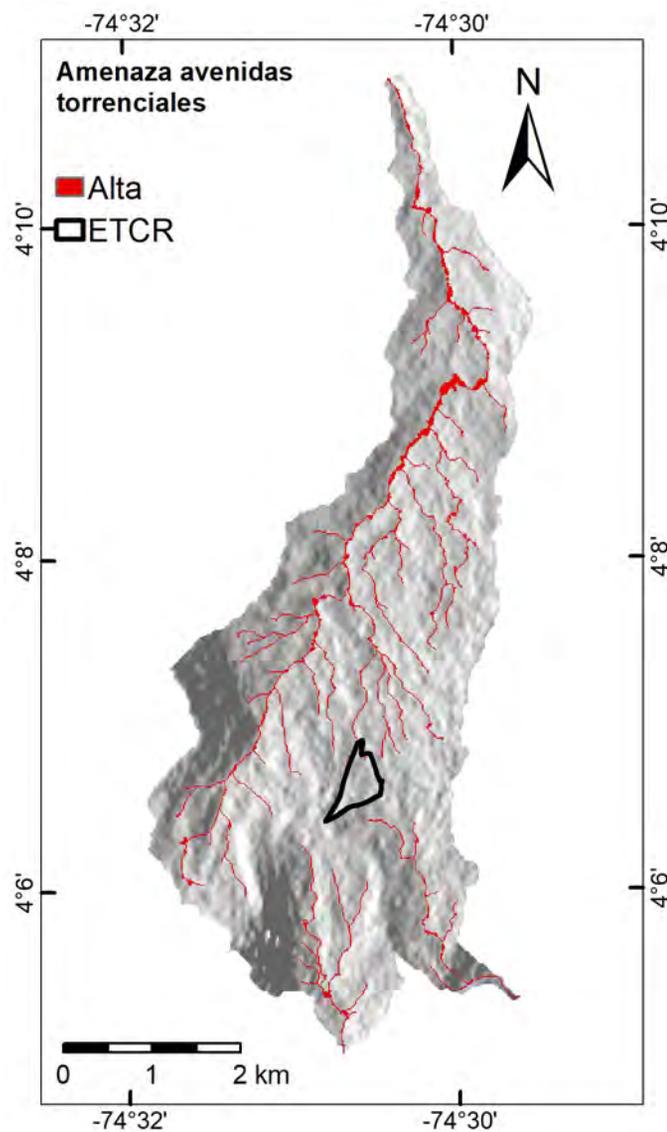


Figura 151: Zonificación de amenaza por avenidas torrenciales

# 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.).
- 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=b693dcd2a20f914ca7c4fa1e9eceebed>
- 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 152, para el antiguo ETCR La Fila, se obtuvieron un total de 542 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 La Fila proporcionando un mejor acercamiento en lo que compete a la ocupación del territorio (Figura 153).

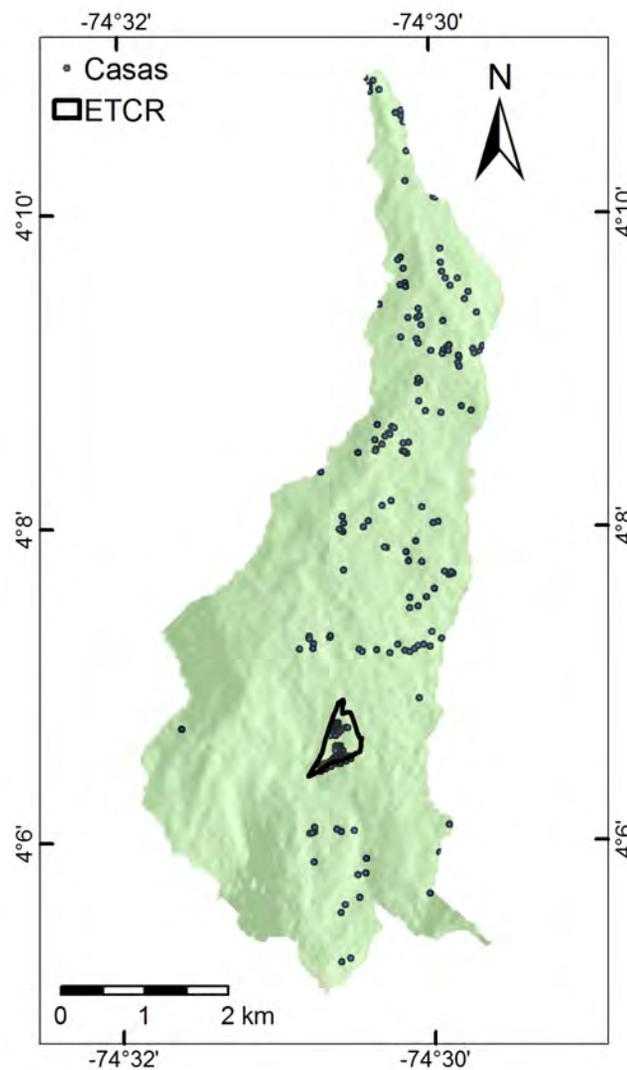


Figura 152: Ocupación territorial

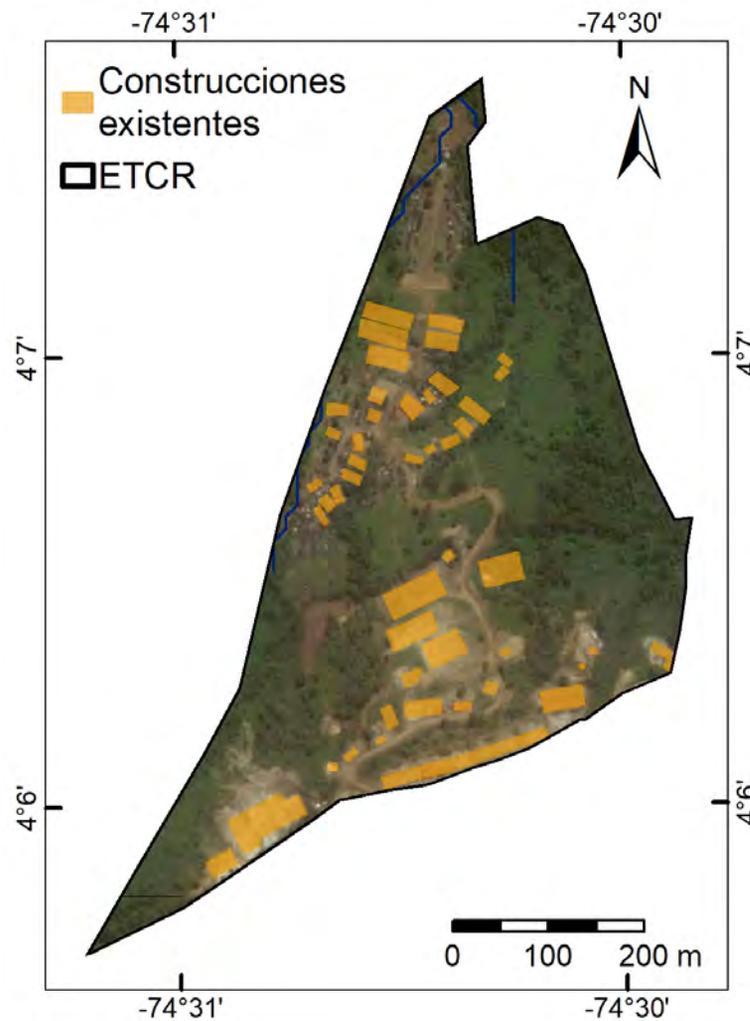


Figura 153: Levantamiento Construcciones

### 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.

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 154.

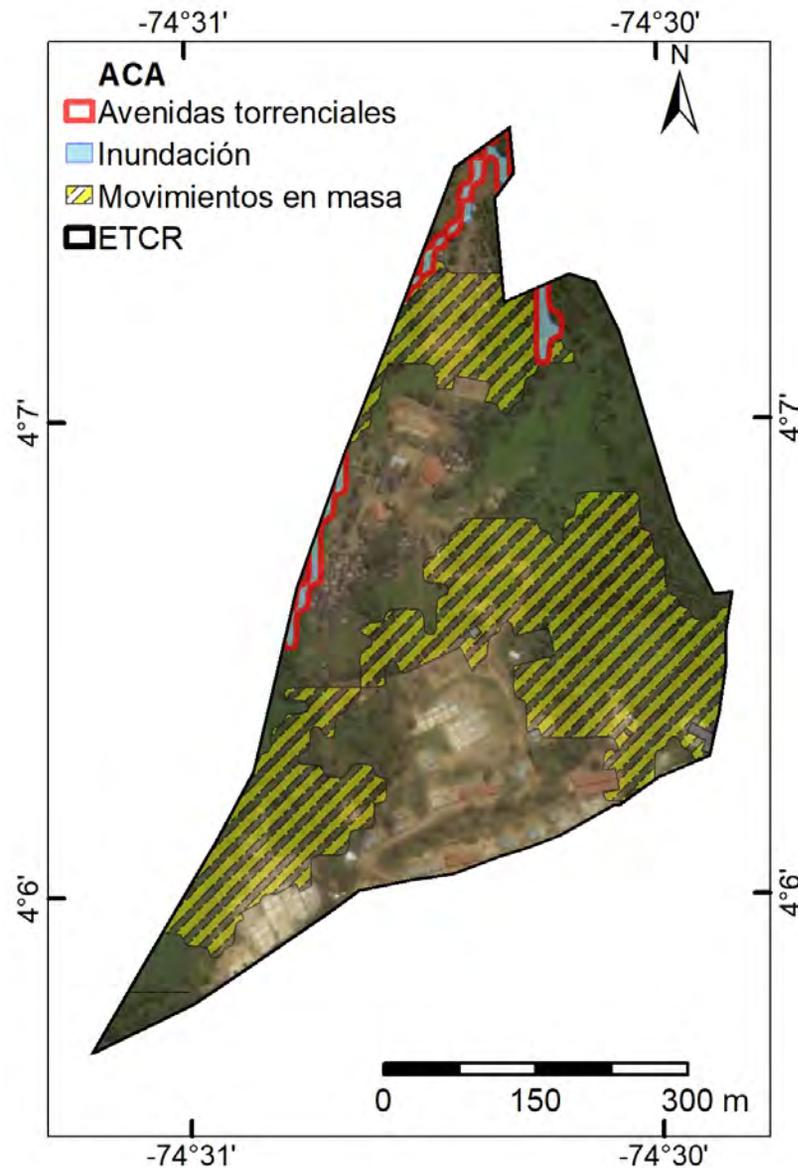


Figura 154: Zonas en condición de amenaza para el predio del antiguo ETCR.

El predio contiene tres grande zonas en condición de amenaza por movimientos en masa localizadas al norte, sur oeste y sur occidente, mientras que para inundación y avenidas torrenciales presenta unas pequeñas franjas alargadas al occidente y norte.

### 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 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 presentado en la Figura 154, 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.

En condición de riesgo se presenta para inundaciones y avenidas torrenciales, la cual se encuentra una construcción al occidente.

### 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

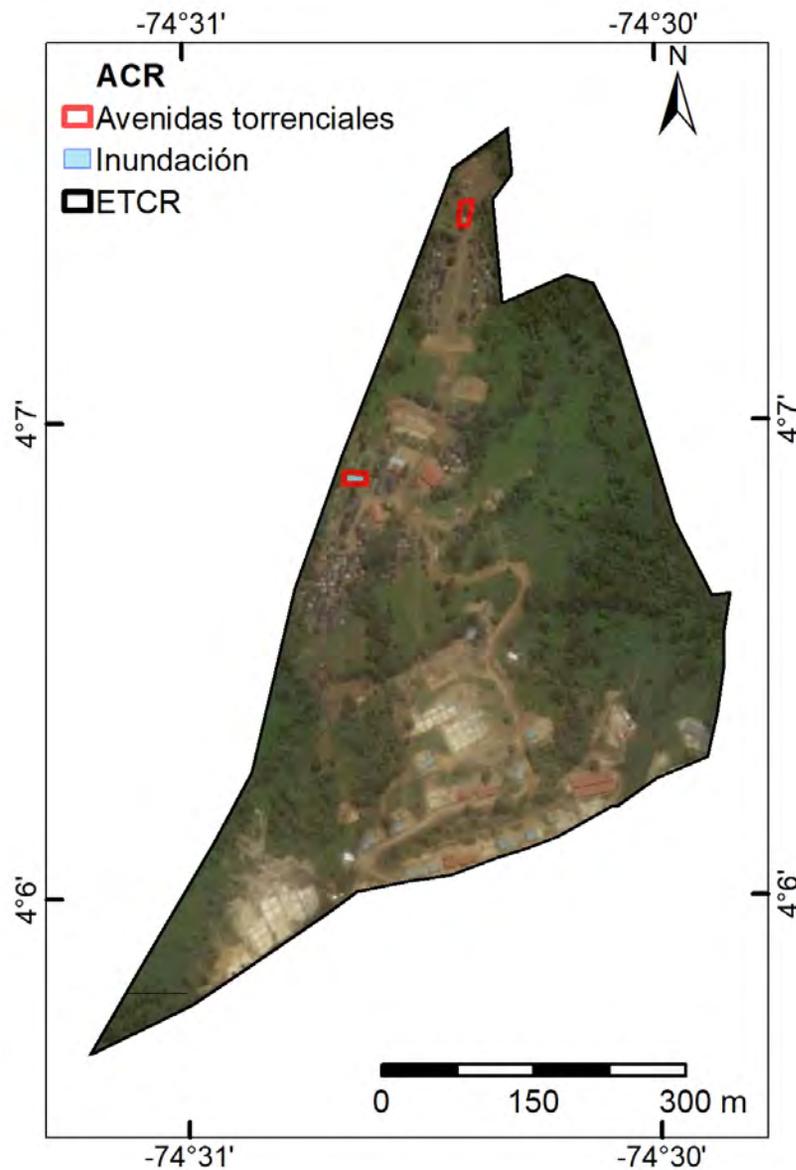


Figura 155: Zonas en condición de riesgo para el predio del antiguo ETCR.

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.
- Se propone un socializaciones con la comunidad acerca del riesgo que implica la extracción no controlada de suelo residual de arenisca (KPgs y Ksg) con el fin de usarlo como material de construcción.

### 11.2.1. 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. Durante los periodos invernales se debe realizar un constante control del estado de las laderas que presentan procesos erosivos, pobre cobertura vegetal y actividades antrópicas como excavaciones, para reducir la ocurrencia de movimientos en masa superficiales en estado saturado y evitar daños sobre la población e infraestructura. Se recomienda realizar cobertura vegetal de baja altura en laderas y/o cobertura con textiles como lo vienen haciendo.
3. Evitar la extracción de material tipo arena en terrenos del antiguo ETCR cercanos a viviendas, se evidencio deslizamiento superficial por saturación de este material y excavaciones en la pata de laderas.

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 156, 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

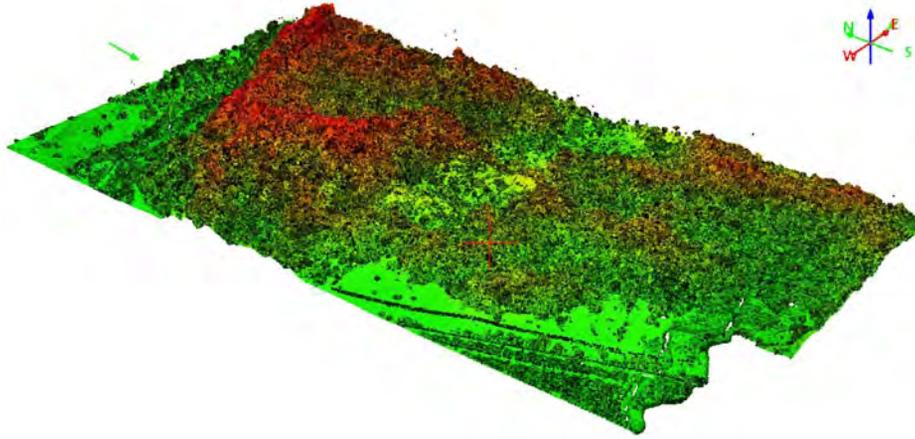


Figura 156: Resultado del trabajo realizado con LIDAR, Elaborado con el software *Quick Terrain Reader* v 8.2.0

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 73449003**

Los resultados para el antiguo ETCR La Fila se observan de la Figura 157 y en la Figura 158

## 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 (2015) 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.

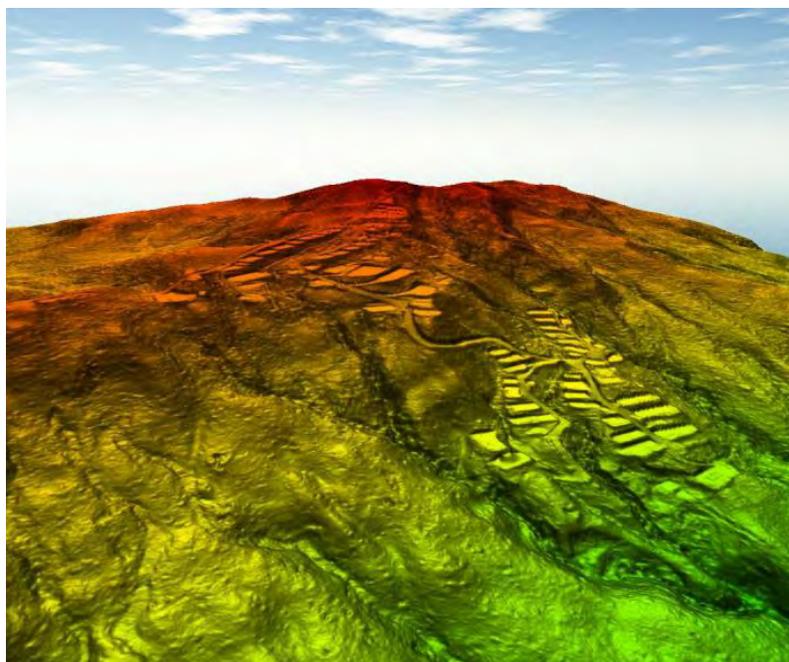


Figura 157: Ortofotografía antigua ETCR La Fila, Icononzo, Tolima



Figura 158: Modelo digital de terreno (DTM), antiguo ETCR La Fila, Icononzo, Tolima

La zona de estudio presenta un comportamiento geomorfológico asociado a la unidad denominada por (INGEOMINAS, 2002) como Sierra homoclinal (Ssc)

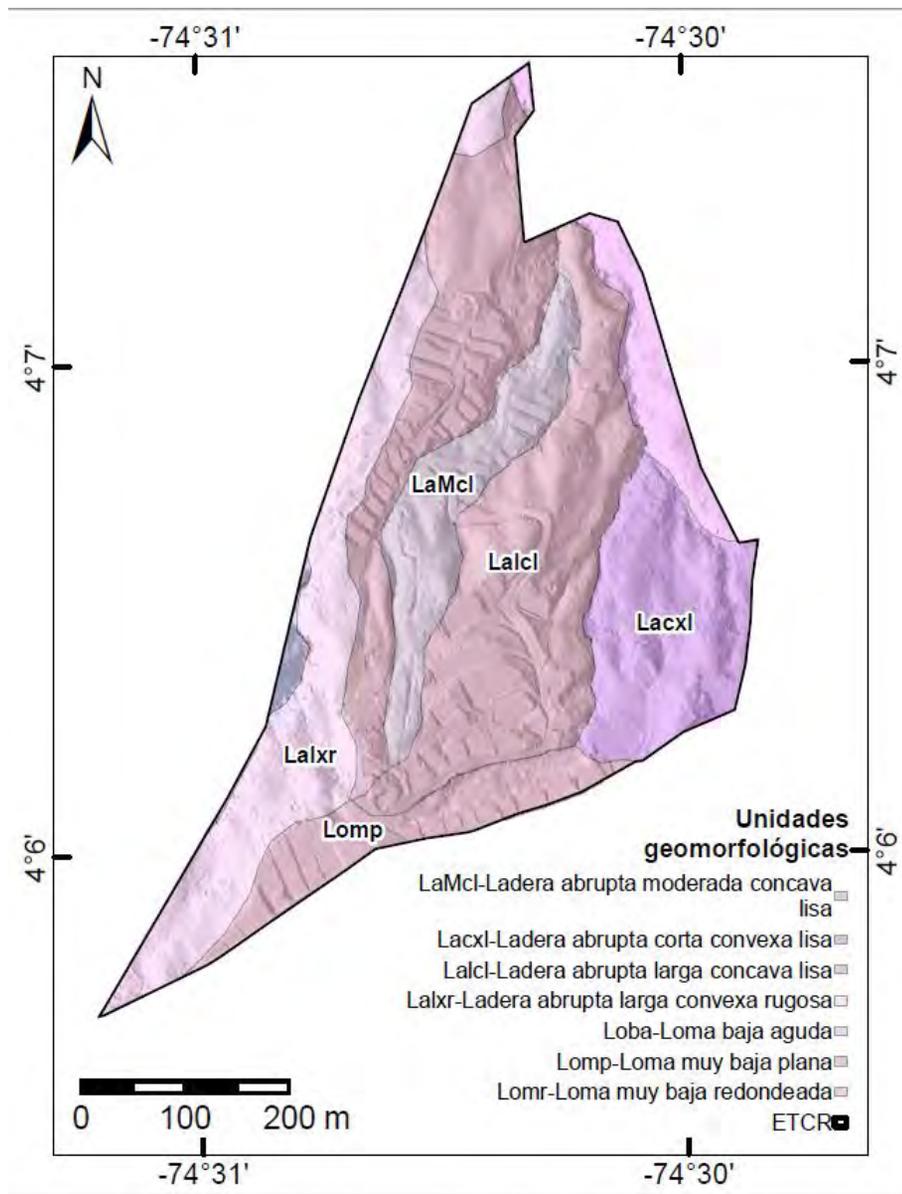


Figura 159: Mapa Geomorfológico local

conformadas por una prominencia topográfica ligeramente simétrica elongada, definida por una secuencia de estratos apilados e inclinados o en el eje de un sinclinal ( $35^\circ$ ) en una misma dirección (Ssh). 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 muy bajas, desarrolladas sobre suelos residuales y rocas meteorizadas asociadas a la Formación Seca (KPgs) (INGEOMINAS (2002)) (Figura 159).

**LaMcl-Ladera abrupta moderada cóncava lisa:** Se presenta una ladera moderada con valores entre 250-500 metros, con aspecto cóncavo, pendiente abrupta con valores entre  $20^\circ$  y  $45^\circ$ , esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de la Formación Seca (KPgs). (Figura 160)

**Lalcl-Ladera abrupta larga cóncava lisa:** Se presenta como una ladera larga con valores entre 50-1000 metros, con aspecto cóncavo, pendiente abrupta con valores entre  $20^\circ$  y  $45^\circ$ , esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de la Formación Seca (KPgs) (Figura 160)

**Lomr-Loma muy baja redondeada:** Se presenta como una loma baja con valores de relieve entre los 50-250 m y forma de cresta redondeada, esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de la Formación Seca (KPgs). (Figura 161)

**Lacxl-Ladera abrupta corta convexa lisa:** Se presenta como una ladera corta con valores entre 50-250 metros, con aspecto convexo, pendiente abrupta con valores entre  $20^\circ$  y  $45^\circ$ , esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de la Formación Seca (KPgs). (Figura 161)

**Loba-Loma baja aguda:** Se presenta como una loma baja con valores de relieve entre los 50-250 m y forma de cresta aguda, esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de la Formación Seca (KPgs). (Figura 161)

**Lalcl-Ladera abrupta larga cóncava lisa:** Se presenta como una ladera larga con valores entre 50-1000 metros, con aspecto cóncavo, pendiente abrupta con valores entre  $20^\circ$  y  $45^\circ$ , esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de la Formación Seca (KPgs). (Figura 160)

**Lomp-Loma muy baja plana:** Se presenta como una loma muy baja con valores de relieve variables menos a 50m y forma de cresta plana, esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de la Formación Seca (KPgs). (Figura 160)

**Lalxr-Ladera abrupta larga convexa rugosa:** Se presenta como una ladera larga con valores entre 50-1000 metros, con aspecto cóncavo, pendiente abrupta con valores entre  $20^\circ$  y  $45^\circ$ , esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de la Formación Seca (KPgs). (Figura 160)

### 12.3. Morfodinámico

En la zona de estudio se identificaron movimientos en masa superficiales activos e inactivos, siendo predominantes en la zona de la vía que conduce a la cervecería 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 Formación Seca (Figura 162, 163).



Figura 160: LaMcl-Ladera abrupta moderada cóncava lisa, Lomp-Loma muy baja plana, Lalcl-Ladera abrupta larga cóncava lisa, Lalxr-Ladera abrupta larga convexa rugosa



Figura 161: Lomr-Loma muy baja redondeada, Lacxl-Ladera abrupta corta convexa lisa, Loba-Loma baja aguda

Por otro lado, en la zona norte del predio se observaron cicatrices de procesos de mayor escala y que representan las características geomorfológicas de la zona: una ladera abrupta con procesos erosivos asociados a los cuerpos de agua que la rodean. Dentro del predio se observaron procesos de erosión superficial en zonas donde se extrae el suelo residual como material de construcción y para la adecuación de canchas(Figura 166), en la zona sur del predio se presentan

procesos de socavación y encharcamiento, este último evidenciado por una fuerte humedad y alta actividad biológica (plantas vasculares) asociada al nacimiento de un cuerpo de agua (Figura 164, 165) (Figura 167) .



Figura 162: Proceso activo producto de la extracción del suelo como material de construcción



Figura 163: Proceso activo producto de la extracción del suelo como material de construcción

## 12.4. Geología para ingeniería

Con el objetivo de definir el conjunto de materiales superficiales (depósitos, suelo, rocas) a partir de sus propiedades y características estructurales, para definir su comportamiento geomecánico a partir de estimaciones de parámetros de campo y laboratorio, se presenta las exploraciones, toma de muestras y



Figura 164: Proceso activo de encharcamiento y socavación



Figura 165: Proceso activo de encharcamiento y socavación

resultados de la exploración realizada.

#### 12.4.1. Exploración y parametrización geotécnica

La etapa de exploración geotécnica para la componente de amenaza en el antiguo ETCR La Fila, está compuesta por 9 puntos de apiques y 16 puntos de perforación (ver Figura 168), de las cuales 6 son para fines de construcciones civiles (PTAP y PTARD). 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



Figura 166: Procesos Morfodinámicos en el antiguo ETCR La Fila

áreas con presencia de procesos morfodinámicos y atributos observados a través de recorridos en campo.

Las dimensiones de los apiques son  $1\text{m} \times 1\text{m}$ , con profundidad de  $1,5\text{m}$ , mientras que las perforaciones mecánicas a percusión a profundidades de  $3\text{m}$  y  $6\text{m}$  con diámetro de  $55\text{ mm}$  tomando muestras cada  $50\text{cm}$  en shelby (muestra inalterada) o en cuchara partida (muestra alterada). En la Figura 169 se muestra a modo de ilustración el sistema de apiques y perforaciones realizadas.

#### 12.4.2. Unidades geológicas superficiales

En el antiguo ETCR La Fila se identificaron 2 unidades geológicas superficiales (UGS), las cuales corresponden al suelo residual asociado la unidad de roca Formación Seca (INGEOMINAS, 2002) y depósitos de origen antrópico (Figura 170).

El material superficial que predomina en el antiguo ETCR La Fila, corresponde a suelo *In Situ*, específicamente al horizonte VI - Suelo residual de Formación Seca del perfil de meteorización según la nomenclatura propuesta por Dearman (1974), ocupando el  $98,7\%$  del predio. Los depósitos cuaternarios antrópicos ocupan un  $1,3\%$  del predio y están asociados a la remoción y adecuación del terreno para el asentamiento de las viviendas provisionales.

El suelo residual de Formación Seca 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 170). Corresponde a una arcilla limosa con arena de color naranja con variaciones a amarillo y crema, completamente meteorizado, poco plástico y húmedo (Figura 171), en algunas zonas se presentan lentes de material con una textura más arenosa

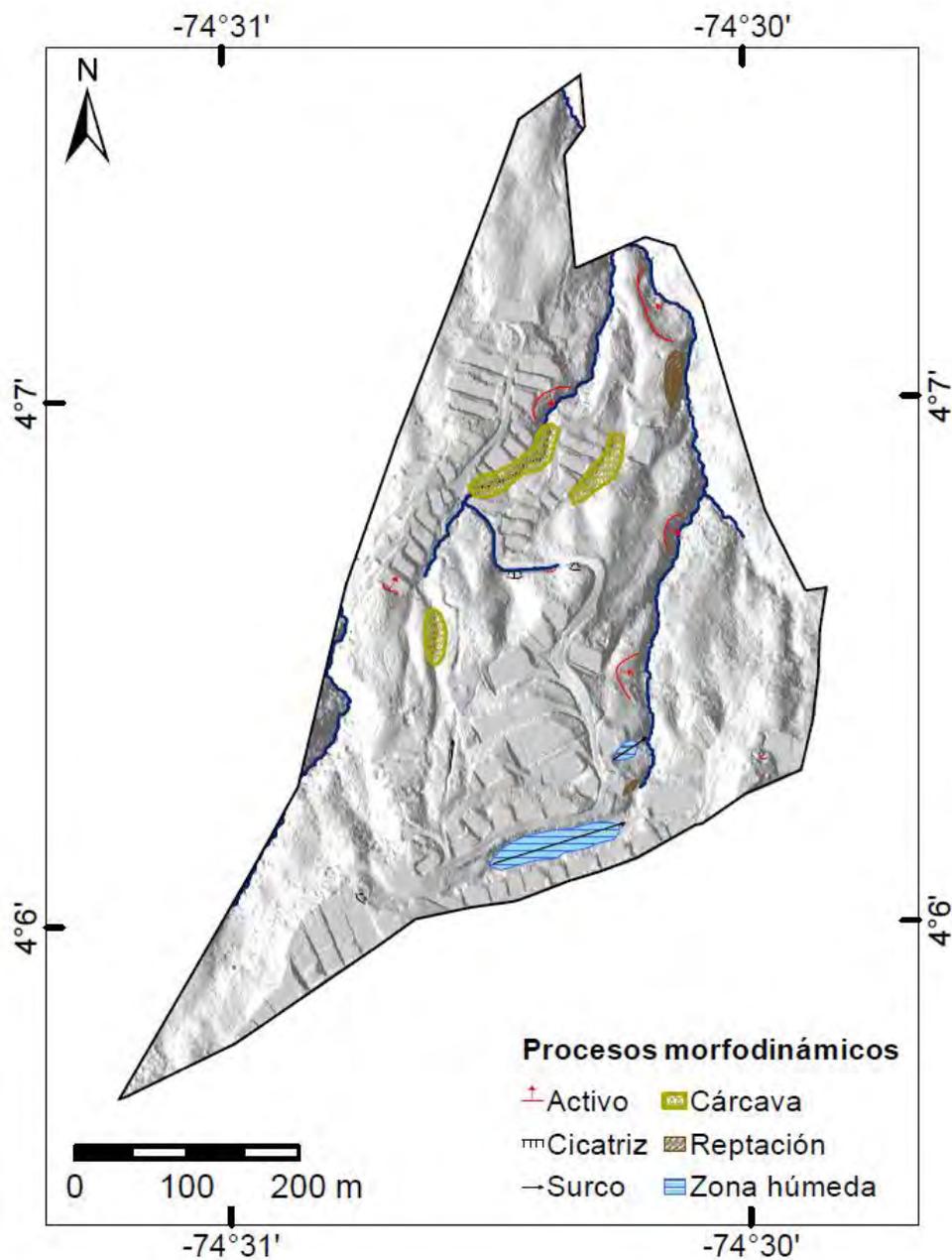


Figura 167: Mapa procesos morfodinámicos antiguo ETCR La Fila

(Figura 172) y mayor contenido de cuarzo evidenciando el comportamiento estratificado de la roca parental: secuencia de arcillolitas y areniscas ricas en cuarzo (INGEOMINAS (2002)).

El material de origen antrópico conforma principalmente los terrenos de vías y zonas aledañas a las viviendas donde se han depositado materiales de origen heterogéneo (Figura 173). Están compuestos por limos arenosos de color naranja a café oscuro. Contiene restos de material orgánico, raíces, basuras (Figura 173),

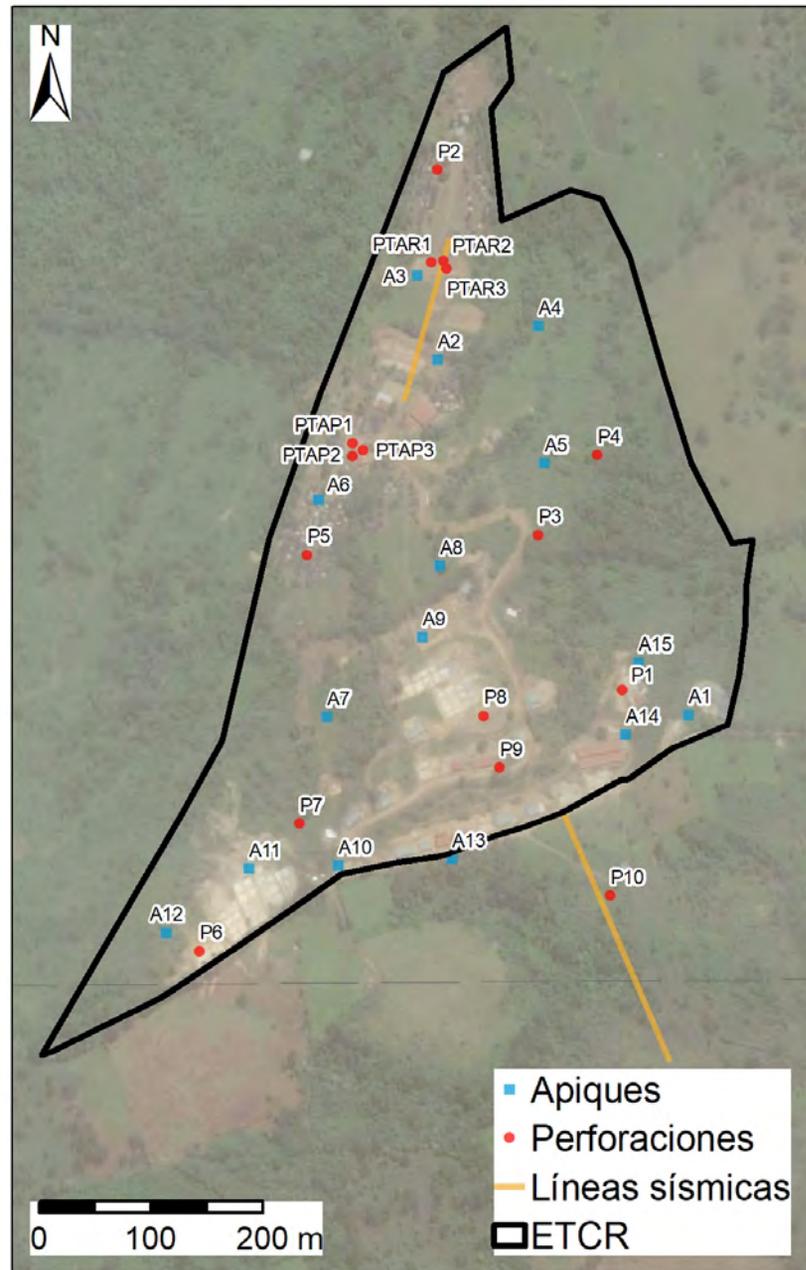


Figura 168: Ubicación exploración ejecutada

escombros y fragmentos de roca.

### 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 propaga-



Figura 169: 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.

ción 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 estratigráfico. Con los parámetros estimados se determina el tipo de perfil de suelo (Tabla. 69), espesor y parámetros sísmicos de cada capa. Además, los parámetros geomecánicos 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 168, 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

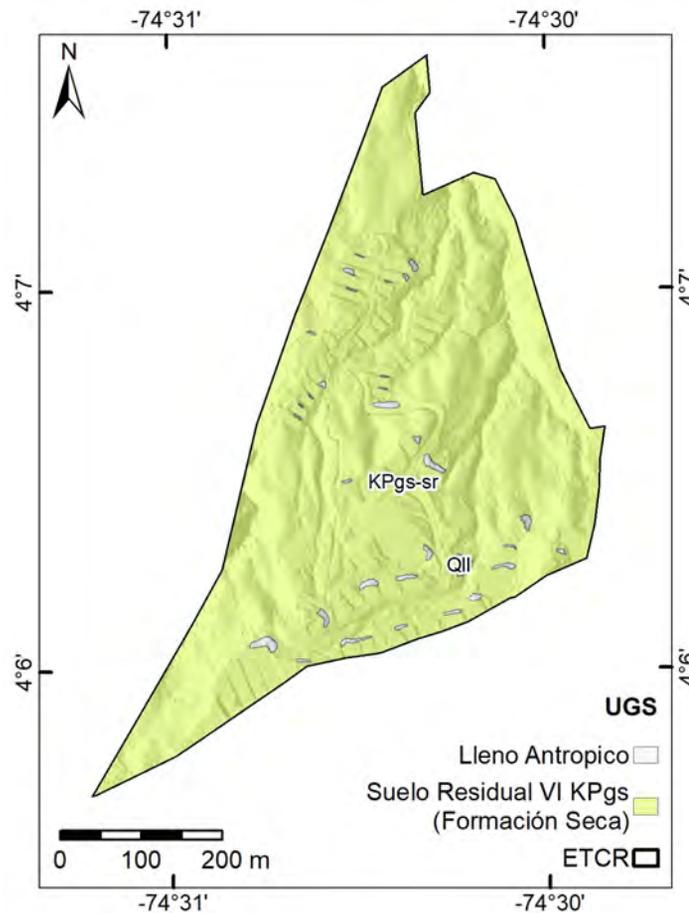


Figura 170: Mapa de unidades geológicas superficiales (UGS) en el antiguo ETCR La Fila. Depósitos Antrópicos (Qll), Suelo Residual VI- Formación Seca (KPgs)

Tabla 69: Clasificación perfiles del suelo a partir de Tabla A.2.4.4 NSR-10 (Asociación Colombiana 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)	

fuente emisora se genera mediante golpes con una masa en lugares previamente definidos denominados puntos de tiro, la ondas se propagan hasta los receptores (geófonos) (Figura 174). 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).

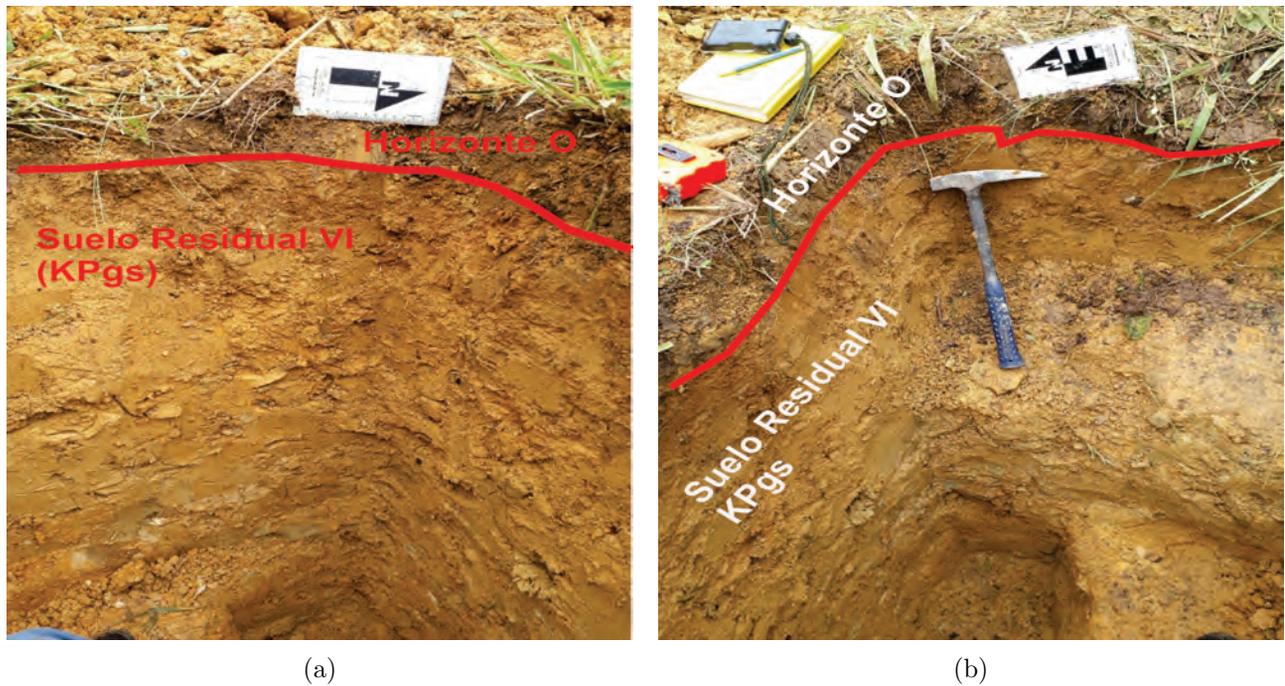


Figura 171: Suelo Residual VI Formación Seca (KPgs-sr)

#### ■ 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. 175) se observa a nivel superficial (2m) un suelo de consistencia blanda  $V_s < 180$  m/s que aumenta su rigidez hasta los 7m con  $V_s$  hasta los 260 m/s a semi-rígida. Luego se evidencia un suelo rígido que se extiende hasta los 16m de profundidad aproximadamente, con  $V_s$  entre 252 y 385 m/s. A partir de esta profundidad se registra una transición a suelo muy denso, alcanzando hasta los 470 m/s. Hasta los 25m aproximadamente se presentan  $V_s$  representativos de suelos muy densos o roca blanda con valores

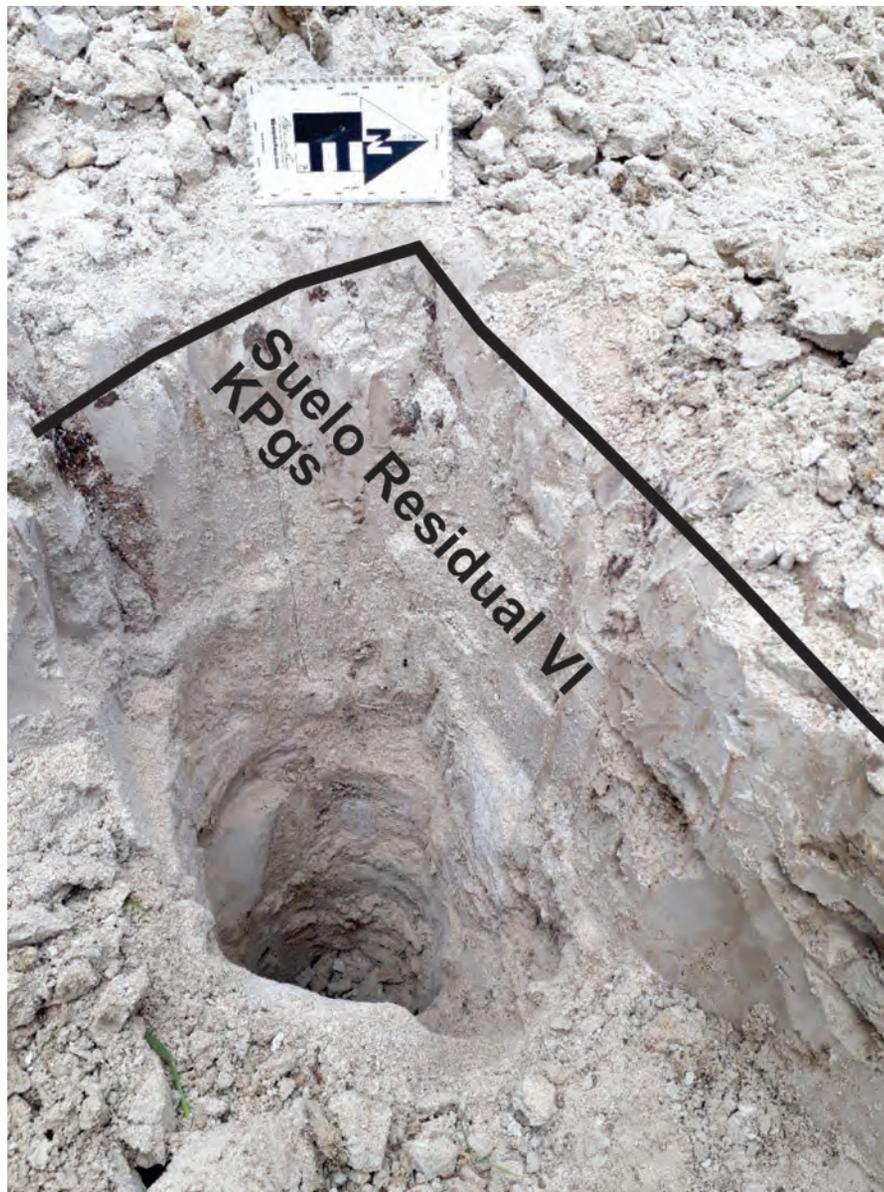


Figura 172: Lente de material arenoso suelo residual VI KPgs

de hasta 920 m/s en una capa que se extiende hasta la máxima profundidad alcanzada en el ensayo.

En la línea sísmica 2 (Figura. 176) Se presenta hasta los 6m aproximadamente un suelo de consistencia blanda a media, con  $V_s < 260$  m/s. Posteriormente se observa un suelo semi-rígido a rígido con  $V_s$  entre 260 y 390 m/s el cual se extiende hasta 15m aproximadamente. Luego se identifica una transición a suelo muy denso con  $V_s$  hasta los 520 m/s. A continuación, se registró una capa de material asociada a la transición entre un suelo muy denso a roca similar a la línea 1 hasta la máxima profundidad explorada.

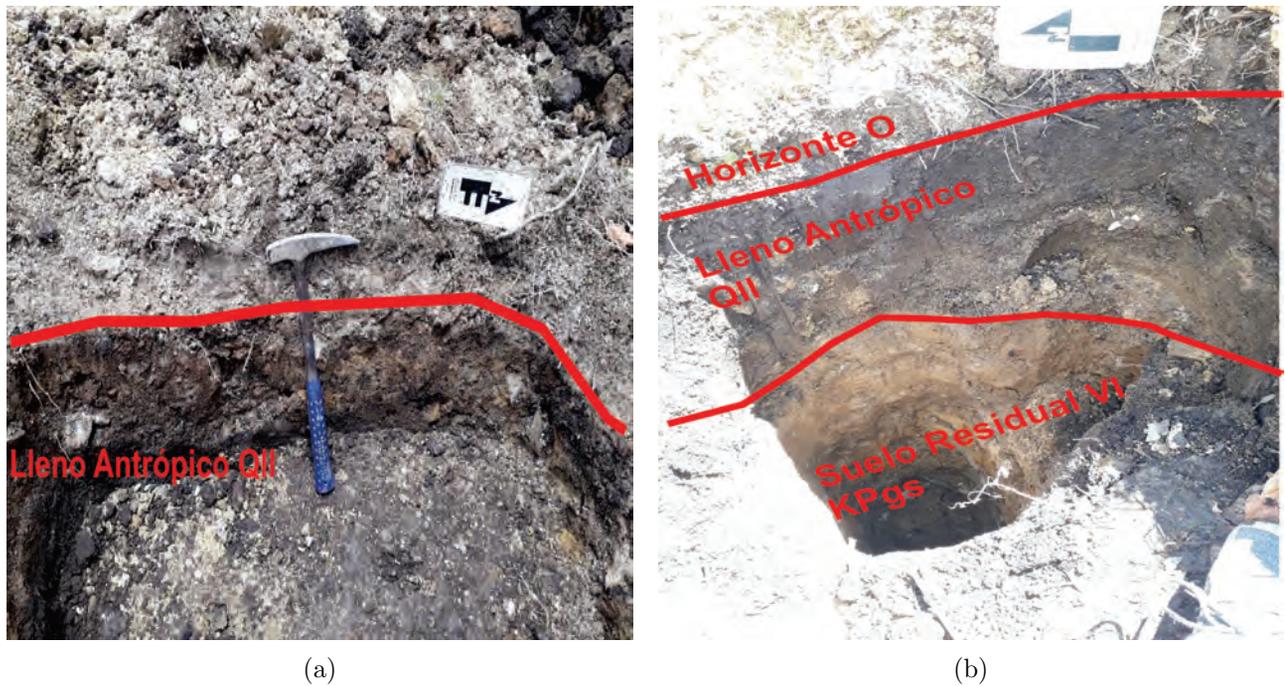


Figura 173: Depósitos Antrópicos en el antiguo ETCR La Fila

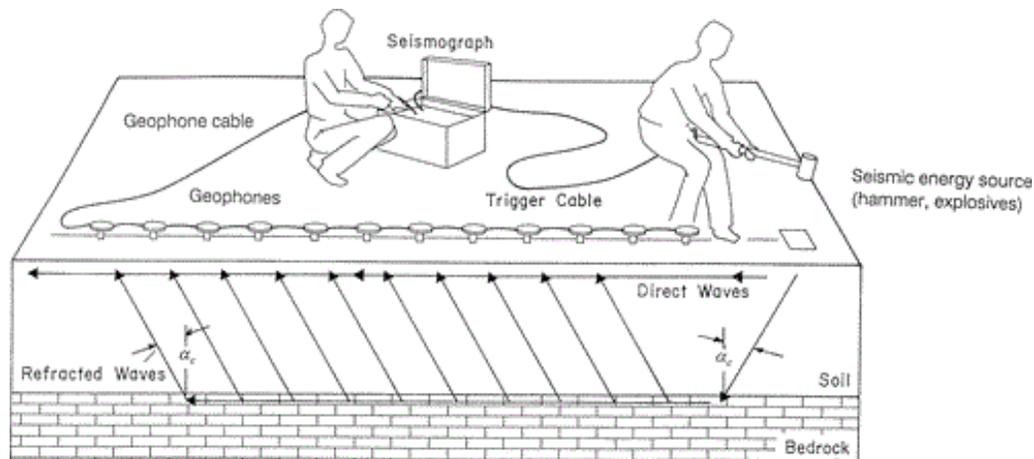


Figura 174: Esquema ensayo de refracción sísmica (ASTM, 2011)

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  $V_{s,30}$ , 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. 70).

#### 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

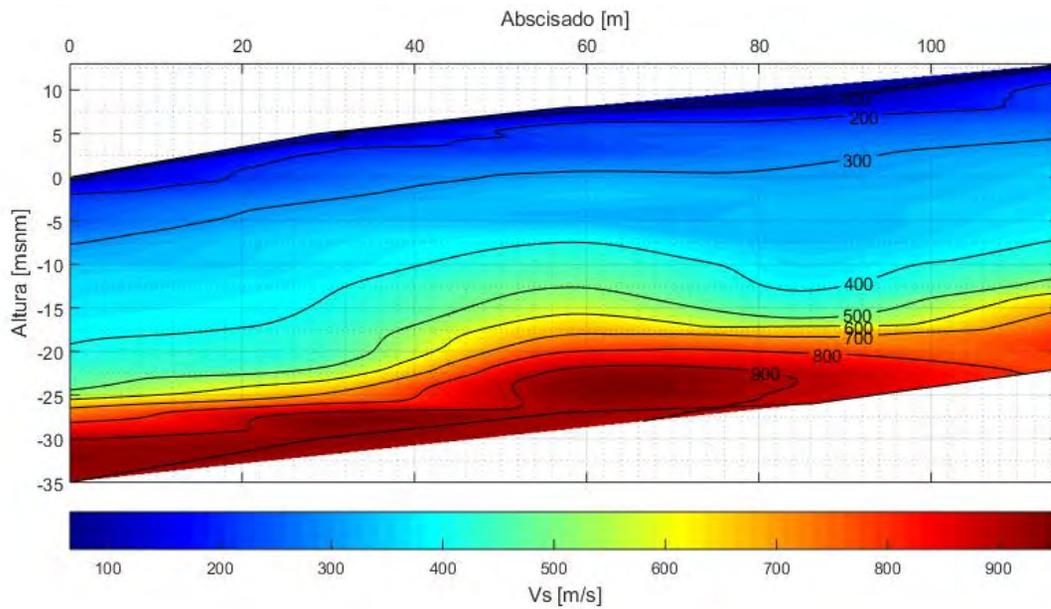


Figura 175: Perfil 2D  $V_s$  línea 1

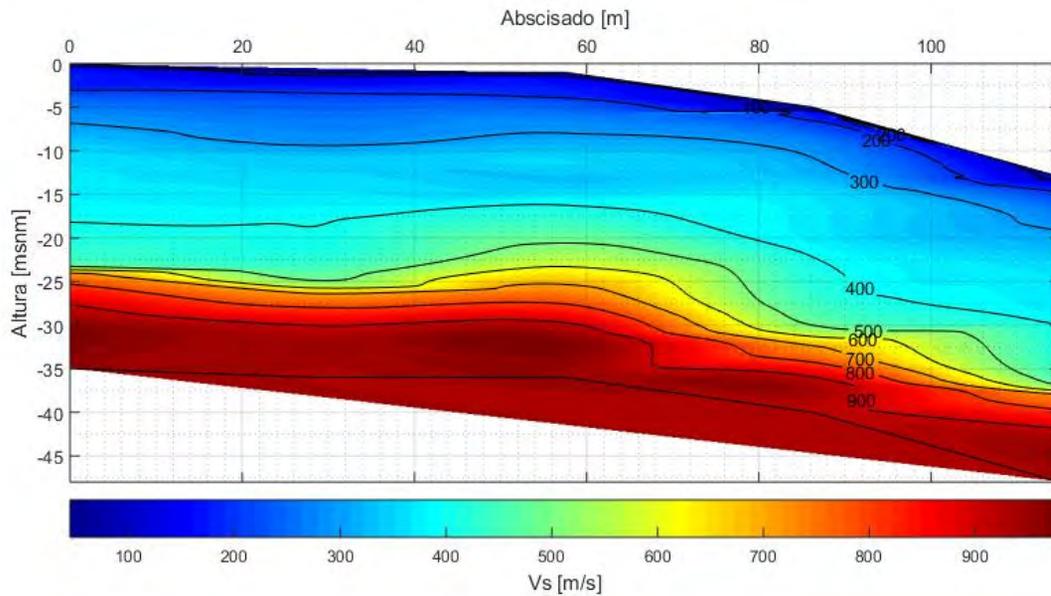


Figura 176: Perfil 2D  $V_s$  línea 2

propósito de caracterizar física y mecánicamente los materiales que conforman el subsuelo explorados en los distintos apiques y perforaciones. En la tabla 71 se presentan los ensayos y cantidad realizados como parte de la exploración geotécnica contemplada en la caracterización detallada para la evaluación de la

Tabla 70: Perfil de suelo

Línea	$V_s30(m/s)$	Tipo de Perfil (NSR-10)
1	358	D
2	372	C

amenaza y el estudio geotécnico de las plantas de tratamiento de agua potable y residual.

Tabla 71: Distribución ensayos de laboratorio

Ensayo	Cantidad	Normas
Humedad natural	67	ASTMD2216
límites de consistencia	28	ASTMD4318
Granulometría por tamizado y lavado sobre la malla No.200	23	ASTMD422
Peso unitario	33	ASTMD7263
Consolidación unidimensional	4	ASTMD2435
Colapso o expansión unidimensional	3	ASTMD4546
Compresión simple o inconfiada	7	ASTMD2166
Corte directo - Consolidado drenado	8	ASTMD2080
Triaxial- Consolidado no drenado (CIU-TXC)	3	ASTMD4767

Adicionalmente, se presenta en la Tabla 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)
- k: conductividad hidráulica saturada (m/s)

Tabla 72: 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	0,50	17,00	15,00	2,00	0,0	88,4	11,6	SP-SM	17,40	16,20				
AP-02-M1	0,50	30,00	25,00	5,00	14,7	30,5	54,8	ML	14,40	8,60		2,00	33,00	
AP-03-M1	0,50	33,00	23,00	10,00	6,4	28,3	65,3	CL			25,50			
AP-04-M1	0,50								19,00	15,60				
AP-04-M2	1,30	31,00	18,00	13,00				CL						
AP-05-M1	0,50								17,00	13,10				
AP-05-M2	1,30	43,00	25,00	18,00				CL						
AP-06-M1	0,50								16,10	11,00				
AP-06-M2	1,30	49,00	31,00	18,00				ML						
AP-07-M1	0,50								13,90	10,20				
AP-07-M2	1,30	39,00	28,00	11,00				ML						
AP-08-M1	0,50								12,50	6,20				
AP-09-M1	0,50								14,50	12,60				
AP-10-M1	0,50								16,70	12,70				
AP-11-M1	0,50	22,00	13,00	9,00				CL						
AP-12-M1	0,50								12,30	6,50				
AP-13-M1	0,50								6,80	5,40				
AP-14-M1	0,50								11,70	7,00				
AP-15-M1	0,50								14,10	8,70				
PP-01-M1	0,75	38,00	33,00	5,00	0,2	61,6	38,2	SM	14,90	13,20				
PP-01-M3	2,75											5,00	35,00	
PP-03-M1	0,75	16,00	14,00	2,00	0,2	70,8	29,0	SM	17,30	15,20	47,8			
PP-04-M1	0,75	14,00	12,00	2,00	1,2	66,2	32,6	SM	19,90	17,60				
PP-04-M3	2,75	17,00	13,00	4,00	3,0	25,3	71,7	ML	20,00	17,00	125,1			
PP-05-M3	2,75	18,00	14,00	4,00	0,0	54,4	45,6	SC-SM	17,00	15,00		30,00	37,00	
PP-06-M1	0,75	20,00	16,00	4,00	1,8	24,6	73,6	CL-ML	19,50	16,80	154,1			
PP-06-M3	2,75	21,80	18,00	3,80	0,5	21,8	77,7	ML	20,80	17,80		41,00	22,00	
PP-07-M1	0,75	23,00	19,00	4,00	0,0	22,4	77,6	ML	15,20	8,50				
PP-08-M1	0,75	32,00	27,00	5,00	0,0	34,5	65,5	ML	15,00	10,40	31,70			
PP-08-M3	2,75	36,00	29,00	7,00	0,0	20,0	80,0	ML	3,80	2,80				9,50E-08
PP-09-M1	0,75	48,00	27,00	21,00	0,0	0,9	99,1	CL	18,60	15,20				1,60E-07
PP-10-M1	0,75	49,80	35,30	14,50	0,0	3,6	96,4	ML	19,00	13,10		0,00	18,00	
PTAP-01-M1	0,75											15,00	25,00	
PTAP-01-M3	2,75	19,00	14,00	5,00	0,1	71,2	28,7	SC-SM	20,30	18,00		57,00	35,00	
PTAP-01-M5	4,75	20,00	13,00	7,00	0,0	22,2	77,8	CL	18,80	15,70				
PTAP-02-M1	0,75								16,50	11,30				
PTAP-02-M2	1,75	22,00	13,00	9,00	0,0	29,8	70,2	CL						
PTAP-02-M4	3,75								19,50	16,80		25,00	28,00	
PTAP-03-M3	2,75								19,30	15,00				
PTAP-03-M5	4,75	21,00	16,00	5,00	4,3	33,8	61,9	CL-ML						4,20E-08
PTAR-01-M1	0,75								20,30	17,10	103,50	26,00	24,00	
PTAR-01-M2	1,75	22,00	15,00	7,00	3,8	22,9	73,3	CL						
PTAR-02-M1	0,75	23,00	17,00	6,00	2,5	42,2	55,3	CL-ML						7,30E-07
PTAR-02-M2	1,75								20,90	17,80		10,00	29,00	
PTAR-02-M4	3,75	22,00	13,00	9,00	0,0	36,9	63,1	CL				1,00	30,00	
PTAR-03-M1	0,75								19,60	16,30	94,50			
PTAR-03-M4	3,75	33,00	17,00	16,00	0,1	0,8	99,1	CL						

### 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.

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 entre los 3 y 6m. 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 ho-

mogéneas 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 – Kpgs-VI:** Esta zona presenta gran variabilidad granulométrica de los puntos explorados, compuestos en su mayoría por limos de baja plasticidad (ML), arcillas de baja plasticidad (CL) y arcilla areno-limosa (CL-ML), tal como se muestra en la distribución de los diferentes puntos en la carta de plasticidad (Figura 177). En la exploración ejecutada en esta zona se presenta valores de N-SPT entre 4 y 50 golpes/0,3m. Los parámetros de resistencia reportados presentan una media de 19,3 kPa para la cohesión y 28,7° 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  $9,5 \times 10^{-10}$  m/s.

En la tabla 73 se presentan las propiedades y el tipo de suelo adoptado para la zona geotécnica homogénea empleada 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  $\phi'$ ) se optó por emplear el valor de la mediana de los distintos valores en la zona, así como también para el peso unitario húmedo ( $\gamma_h$ ) y la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ).

Tabla 73: Parámetros geotécnicos para la unidad geológica superficial

Zona	Clasificación U.S.C.S	$c'$ (kPa)	$\phi^\circ$	$\gamma_h(kN/m^3)$	$K_s(m/s)$
1 – Kpgs-VI	CL-ML	15	29	17	$1,6 \times 10^{-9}$

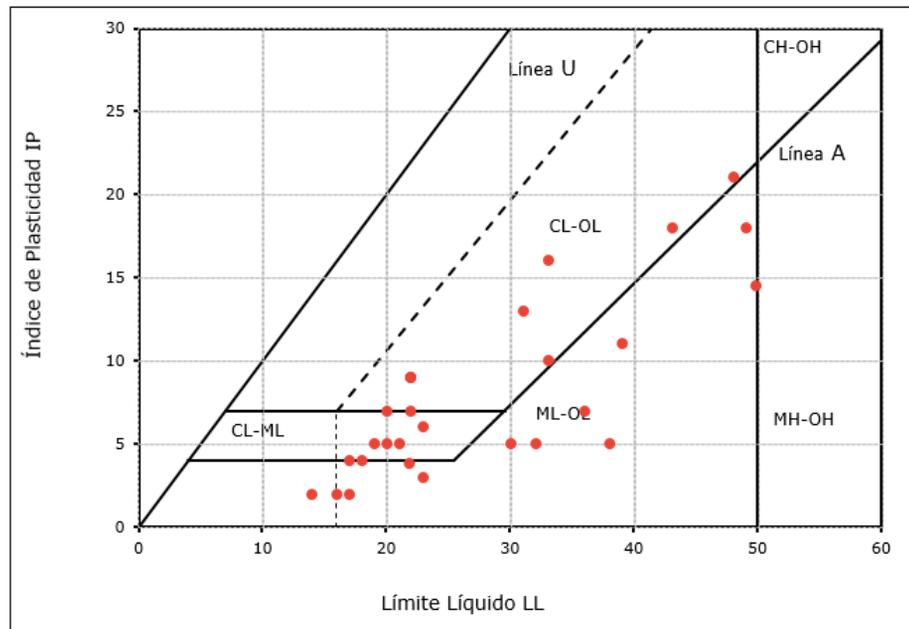


Figura 177: Variabilidad en los límites de consistencia de la zona 1 mediante la Carta de plasticidad de Casagrande.

## 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 178).

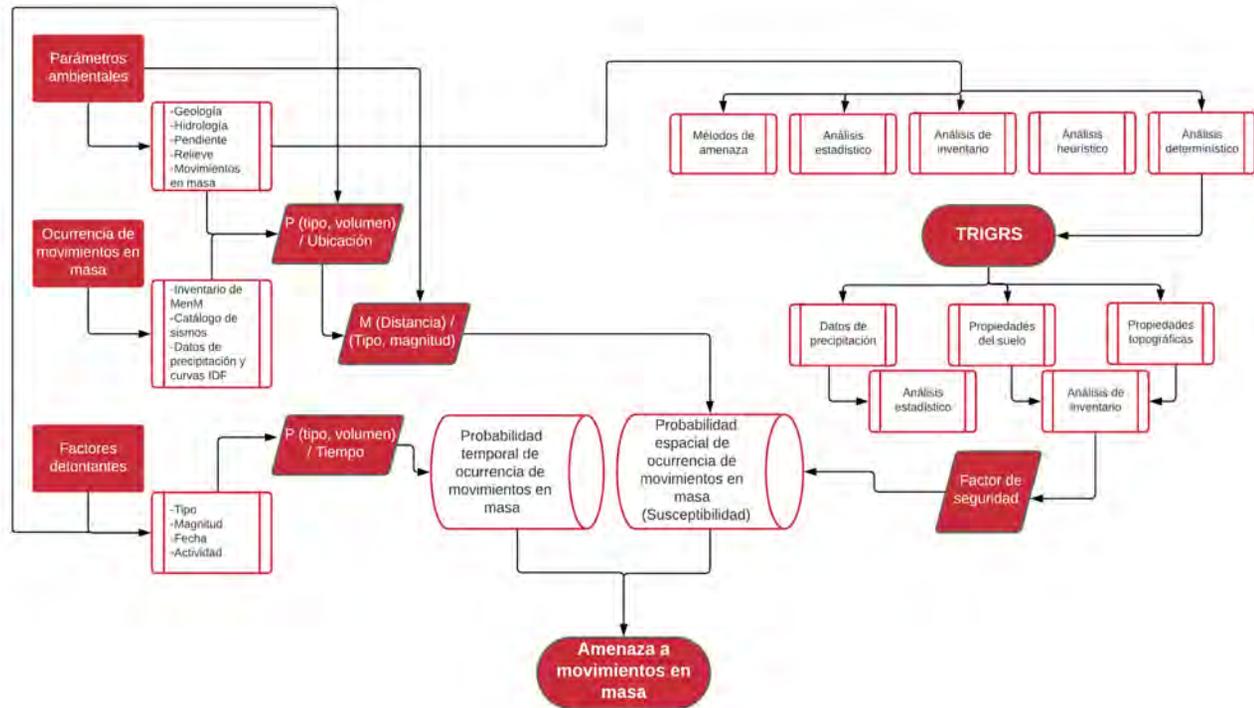


Figura 178: Esquema metodológico de la evaluación de amenaza empleando TRIGRS como modelo de amenaza. Adaptado de van Westen y cols. (2008)

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 179).

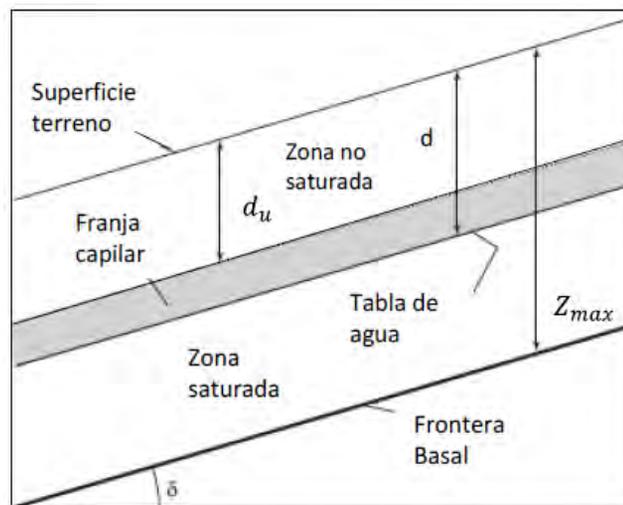


Figura 179: Condiciones hidrológicas en los estratos superficiales del suelo. Adaptado de Baum y cols. (2008)

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 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 – KPgs-VI	franco arcilla limosa	0,21	0,51	0,30	$1,60 \times 10^{-9}$

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 La Fila, 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
42.91	28.29

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 humedo 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
Cohesión ( $Pa$ )	40 %	15000
Ángulo de fricción ( $\circ$ )	10 %	29
Peso Unitario húmedo ( $N/m^3$ )	3 %	17000
Conductividad hidráulica saturada ( $m/s$ )	90 %	$1,60E - 09$

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 180, 181, 182, 183 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

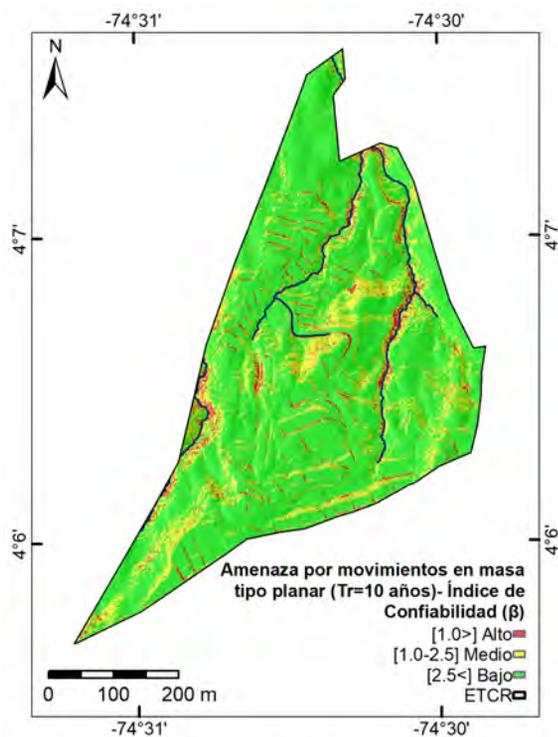


Figura 180: Amenaza por movimientos en masa tipo planar- a) Escenario Tr=10 años parcialmente saturado

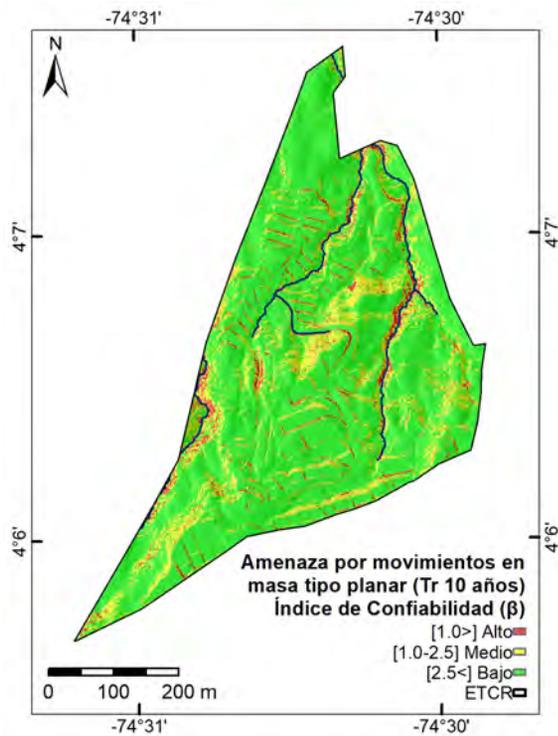


Figura 181: Amenaza por movimientos en masa tipo planar- Escenario Tr=10 años saturado

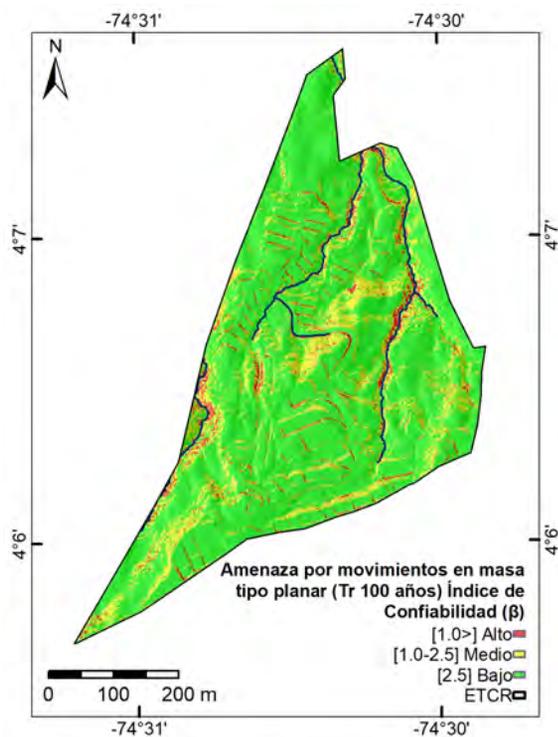


Figura 182: Amenaza por movimientos en masa tipo planar- Escenario Tr=100 años parcialmente saturado

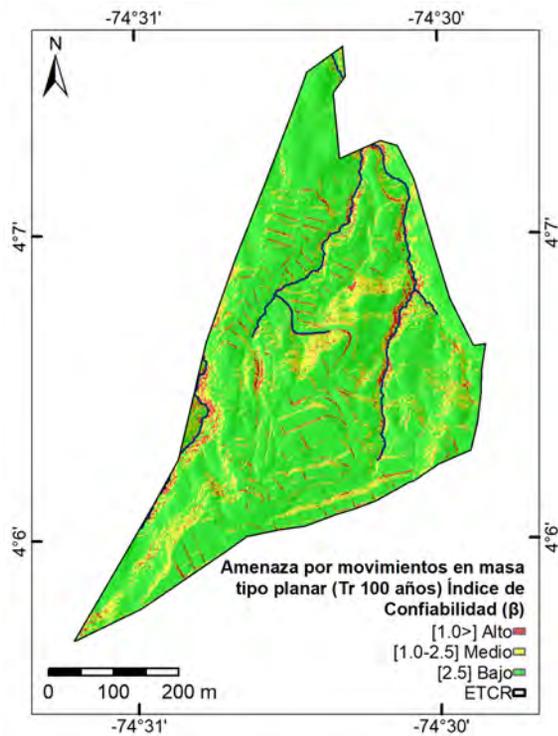


Figura 183: Amenaza por movimientos en masa tipo planar- Escenario Tr=100 años saturado

de las capas del subsuelo (Figura 184).

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.

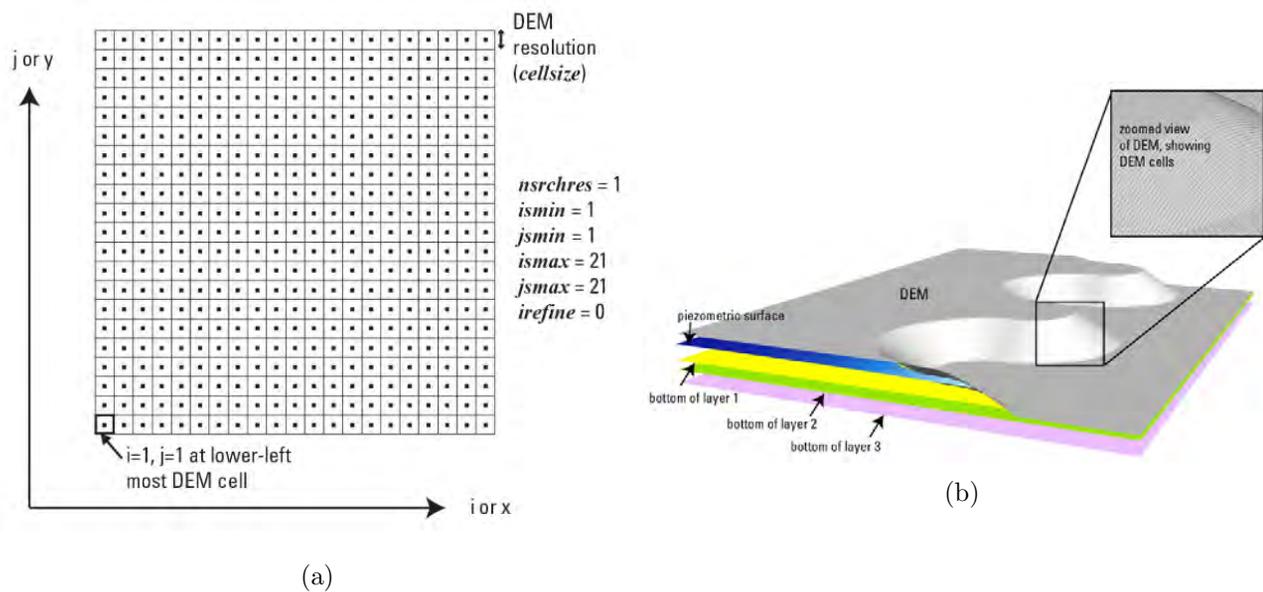


Figura 184: a) Matriz de análisis Scoops3D (Reid y cols., 2015). b) Capas de entrada

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 12.4.5 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. 168) y el ensayo de la línea sísmica donde se evidencian cambios a materiales más competentes. La primera capa se limita a los 15m y la segunda se limita hasta los 25m, zonas con velocidades de onda hasta los 360m/s y 760m/s respectivamente.
- Superficie piezométrica, para el caso de un nivel de agua alto se realizó la distribución espacial desde los 2m en la zona norte hasta los 6m en la zona sur, en la zona norte se halló el NF en el Apique 3 y las perforaciones correspondientes a la PTAR, mientras en el sur no se identificó el NF por lo que se asume 6m, la máxima profundidad alcanzada en la exploración.

Tabla 77: Parámetros geotécnicos para análisis en Scoops3D.

	Zona	$c'$ (kPa)	$\phi^\circ$	$\gamma_h(kN/m^3)$
1	Kpgs-VI	15	29	17
	Kpgs-V	15	36,84	19,57
	Arenisca	215	40	24,5

### 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 límite más rigurosos (Hungry, 1987; Lam y Fredlund, 1993).

$$F = \frac{\sum R_{i,j} [c_{i,j}A_{h_{i,j}} + (W_{i,j} - Z_{pz_{i,j}}\gamma_w A_{h_{i,j}}) \tan \phi_{i,j}]}{\sum W_{i,j} [R_{i,j} \sin \alpha_{i,j} + k_{eq}e_{i,j}]} \quad (12.10)$$

$$m_{\alpha_{i,j}} = \cos \varepsilon_{i,j} + \frac{\sin \alpha_{i,j} \tan \phi_{i,j}}{F} \quad (12.11)$$

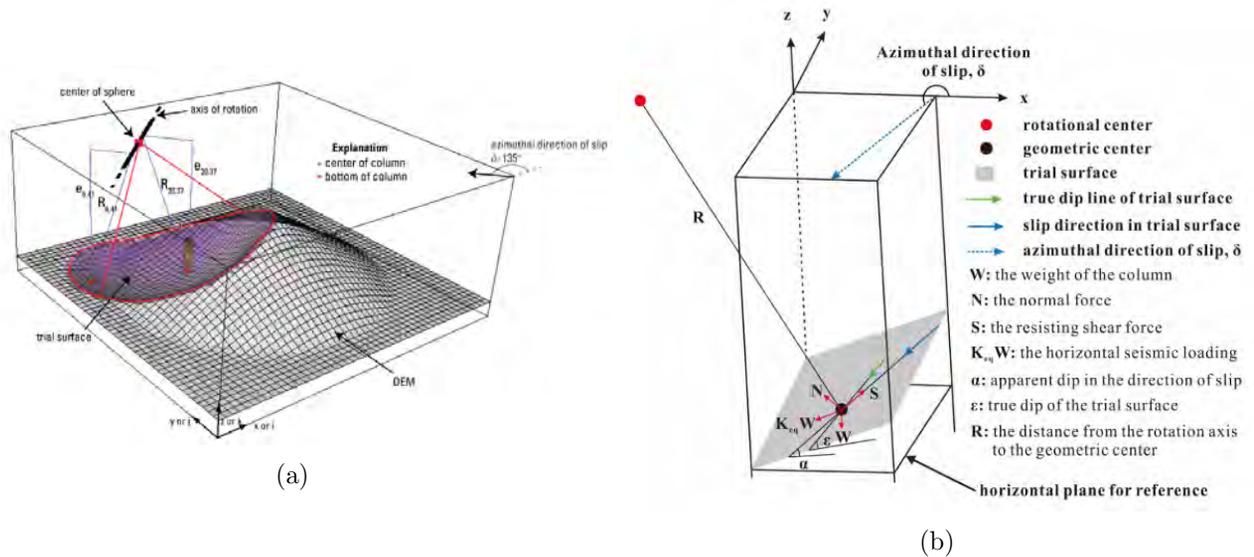


Figura 185: a) Diagrama 3D del análisis de estabilidad (Reid y cols., 2015). b) Diagrama de fuerzas sobre columna típica (Zhang y Wang, 2019)

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 185). 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 Título 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.186)

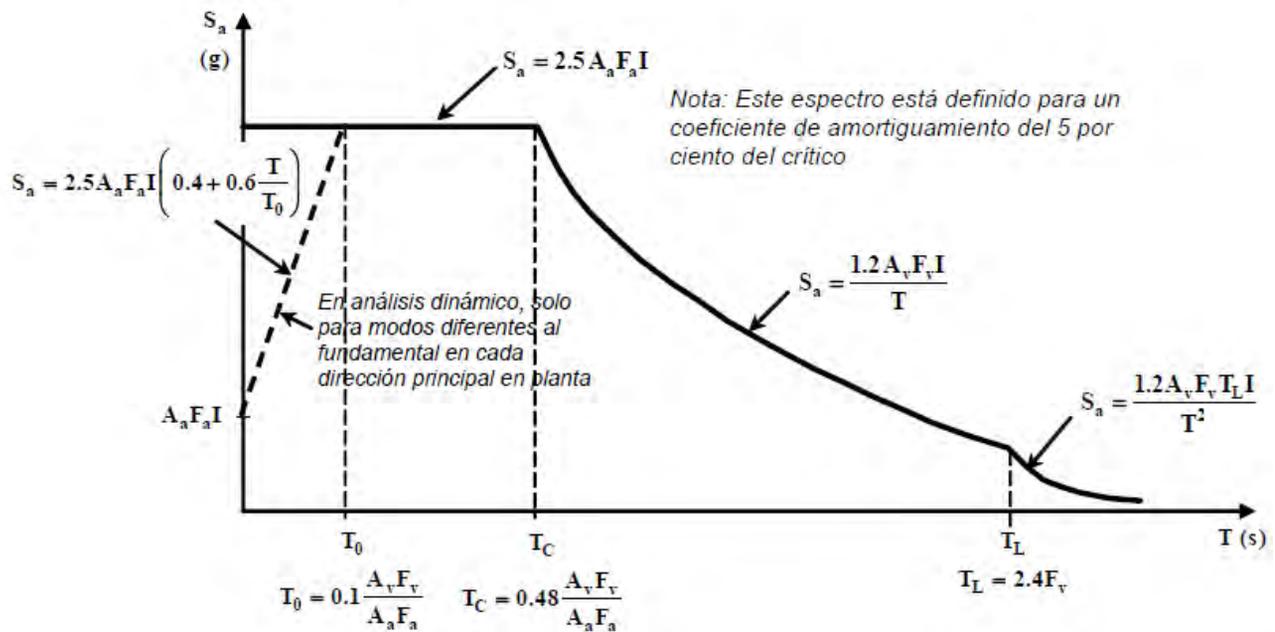


Figura 186: Espectro elástico de aceleraciones en superficie, amortiguamiento del 5% (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010)

$$A_{max} = A_a \cdot F_a \cdot I \tag{12.12}$$

$$A_{max} = 0,20 \cdot 1,3 \cdot 1,0 = 0,26$$

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 Icononzo  $A_a = 0,20$  (Asociación Colombiana 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. 187).
- $I$  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).

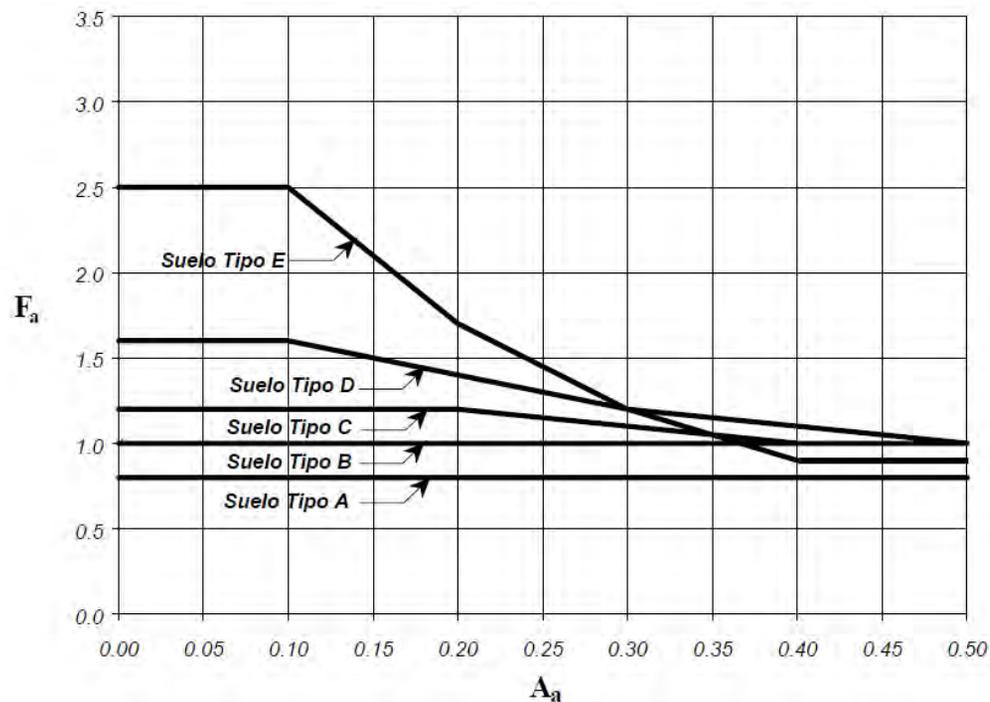


Figura 187: Coeficiente de amplificación  $F_a$  del suelos para periodos cortos del espectro (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010)

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 %)”.

$$K_{ST} = K_{eq} = 0,80 \cdot A_{max} \tag{12.13}$$

$$K_{ST} = K_{eq} = 0,80 \cdot 0,26 = 0,21$$

Se obtiene un valor para el coeficiente pseudoestático  $K_{eq} = 0,21$  el cual es usado para el análisis sísmico en Scoops3D para la fuerza horizontal ( $k_{eq} \cdot W_{i,j} = 0,21 \cdot W_{i,j}$ ).

### 12.6.3. Resultados

En la Figura 188 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 (2 a 6m), 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	0,0 %	0,0 %	0,0 %	84 %
1 – 1,5	0,8 %	75,3 %	35,7 %	16 %
> 1,5	99,2 %	24,7 %	64,3 %	0,0 %

En el escenario 1 no actúan fuerzas externas y el terreno se encuentra en estado seco, se evidencia un área (0,8 %) con  $FS$  entre 1 y 1,5 en la zona central, en la ladera que se encuentra sobre la vía principal. Al aplicar una fuerza sísmica con  $k_{eq} = 0,21$  en estado seco (escenario 2) las zonas con  $FS$  entre 1 y 1,5 aumentan hasta un 75,3 % y las zonas con  $FS > 1,5$  se reducen del 99,2 % al 24,7 %.

En el escenario 3 el análisis se efectúa con un nivel de agua alto sin fuerzas externas, las zonas con  $FS$  entre 1 y 1,5 aumentan en la zona central, aumentando en un 34,9 % respecto 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 alto de agua, el área con  $FS < 1$  alcanza un 84 % y no hay áreas con  $FS > 1,5$ ; se evidencia la fuerte influencia de la fuerza sísmica en los escenarios 2 y 4.

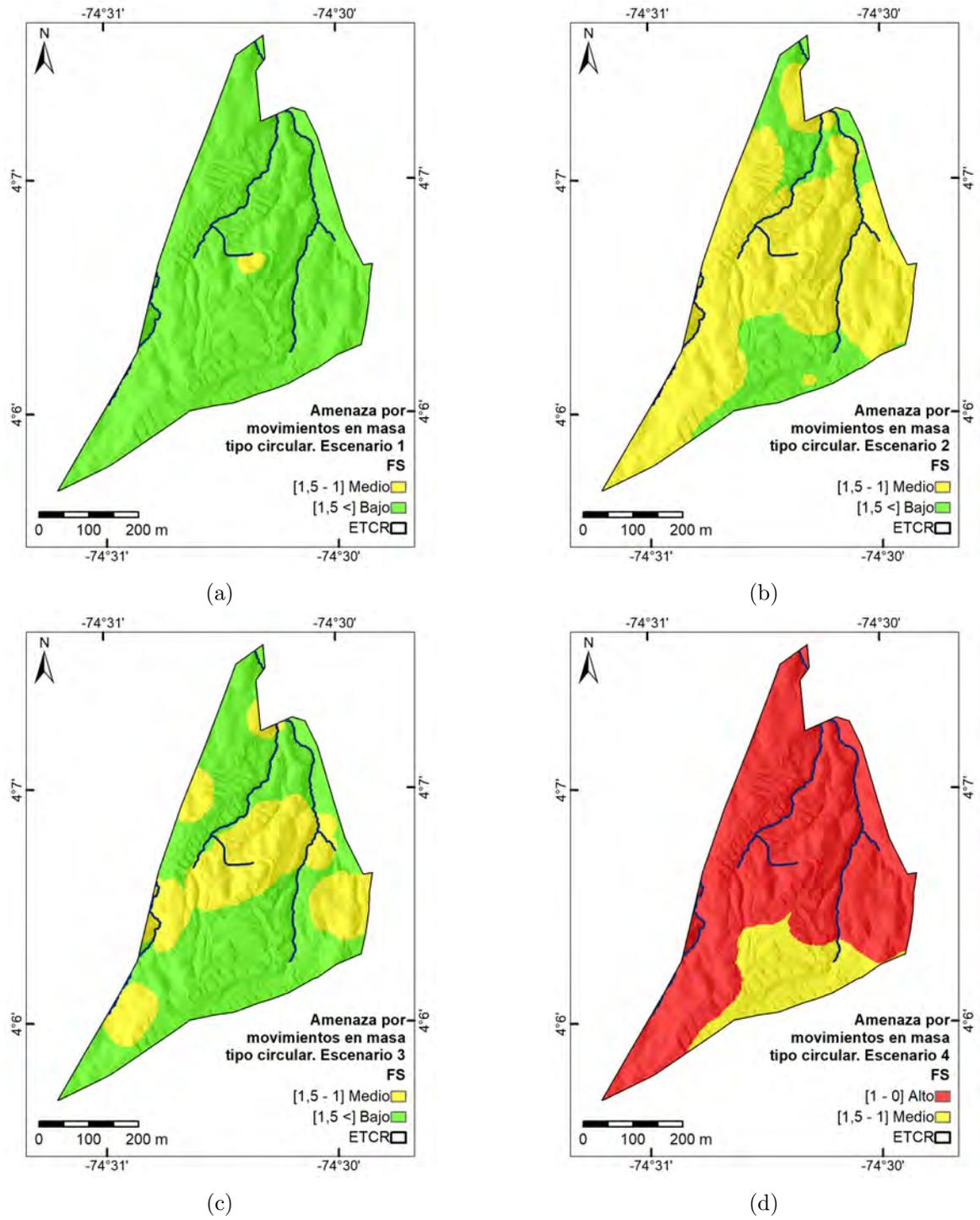


Figura 188: Amenaza por movimientos en masa tipo circular a) Escenario 1 estado seco b) Escenario 2 estado seco y fuerza sísmica c) Escenario 3 nivel de agua alto d) Escenario 4 nivel de agua alto y fuerza sísmica

## 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 189)

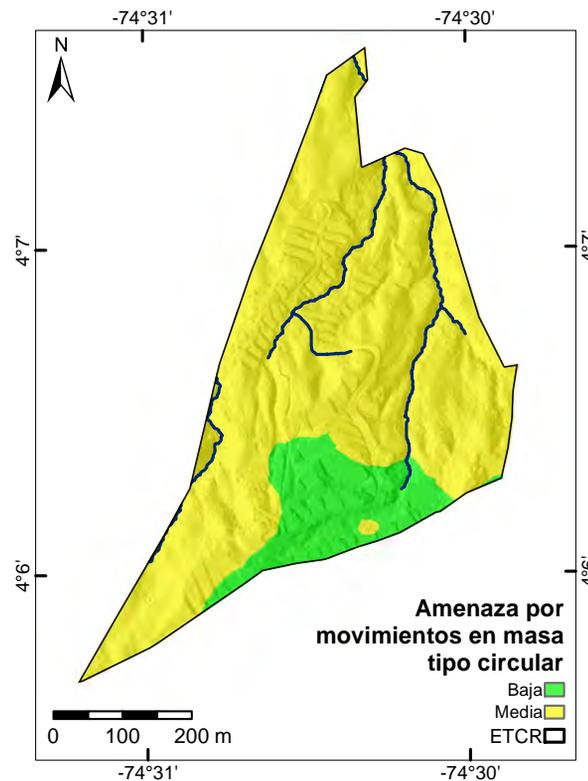


Figura 189: Amenaza por movimientos en masa tipo planear

- 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 190). 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

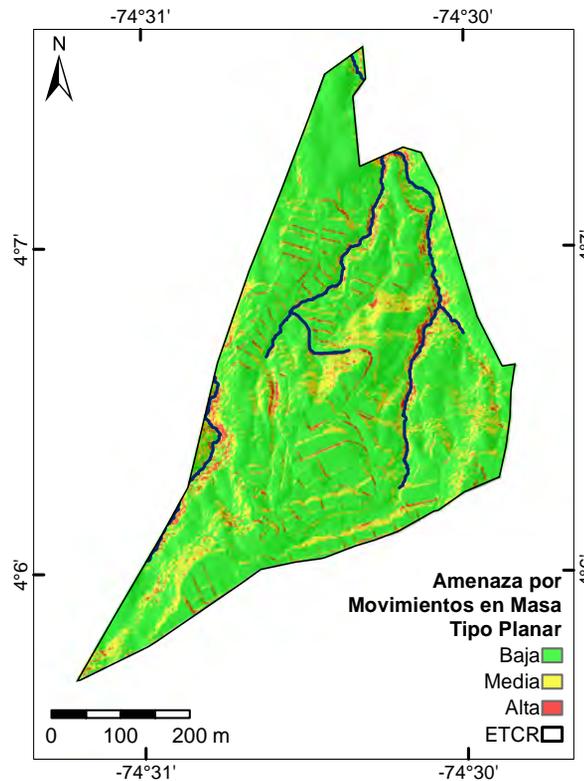


Figura 190: Amenaza por movimientos en masa tipo circular

indica que se debe realizar un proceso final de depuración, incorporando 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 191).

- 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 192.

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	12,3
Media	83,9
Alta	3,8

Se resalta que los valores asociados a la categoría alta representa las zonas

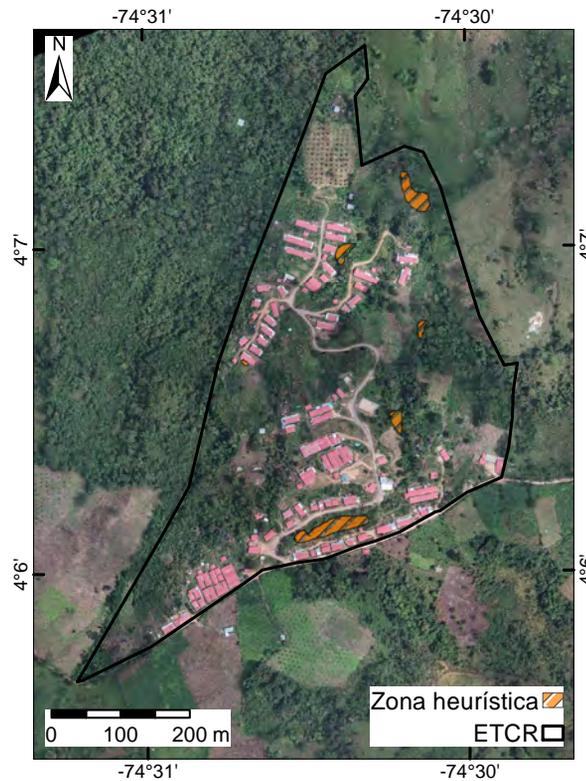


Figura 191: Ajuste heurístico

donde se evidencian procesos activos en el predio, baja resistencia en los materiales bajos condiciones extremas y las zonas de pendientes muy abruptas que se distribuyen a lo largo del predio. Los valores medio de amenaza están asociados a las condiciones geomorfológicas locales del predio, donde se tienen laderas en su mayoría con pendientes abruptas y extensiones largas. Por otro lado, las zonas de menor pendiente y materiales más resistentes ante eventos extremos 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 límite 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

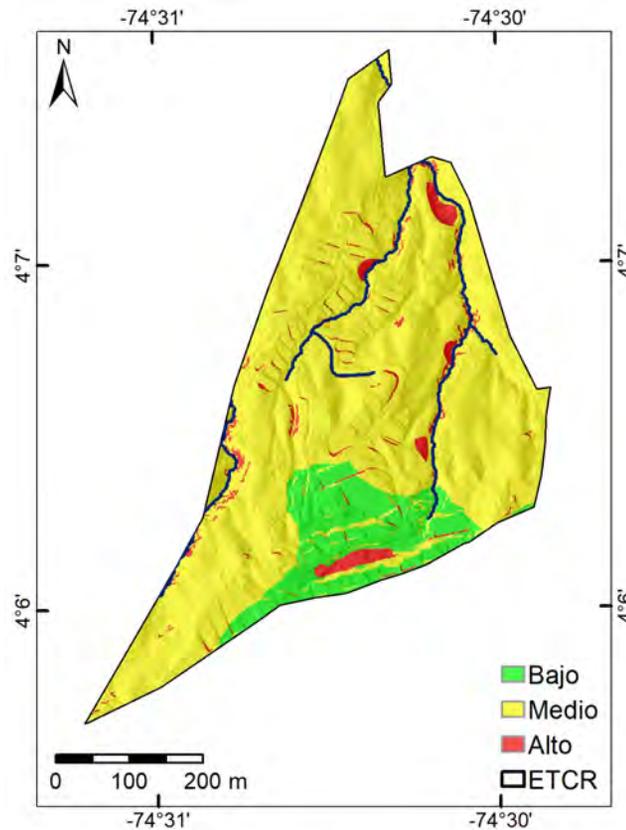


Figura 192: Amenaza por movimientos en masa

previstos para el antiguo ETCR La Fila.

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 pendientes. Las unidades de ladera construidas y los cortes sobre las zonas de interés se presentan en la Figura 193.

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 per-

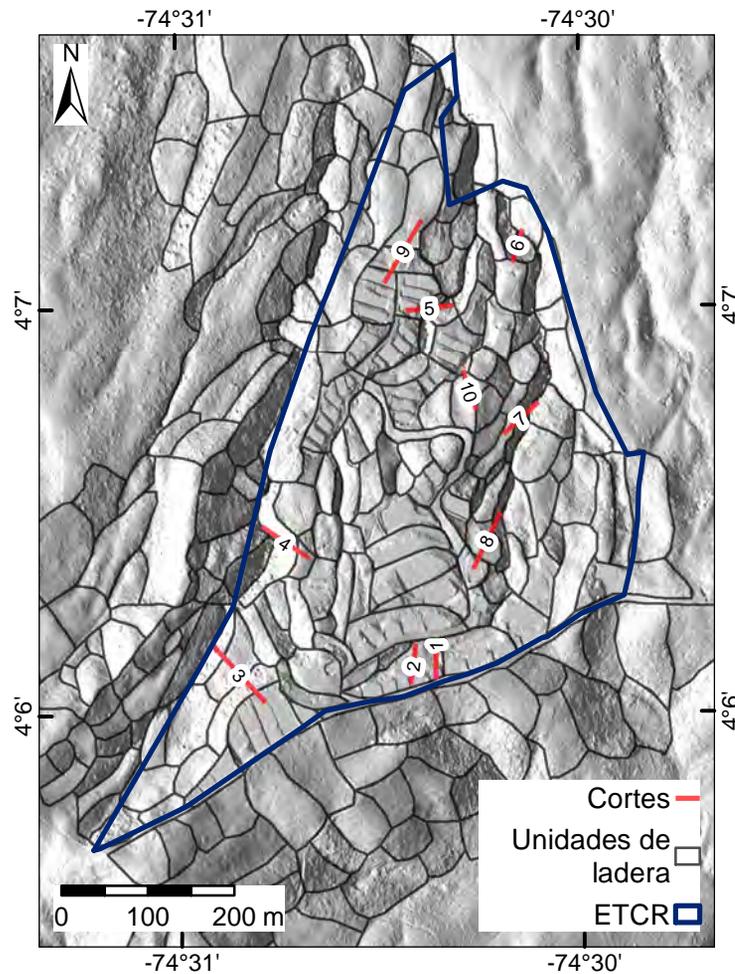


Figura 193: Mapa de las unidades de ladera y los cortes realizados para antiguo ETCR La Fila

mite 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 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-C2

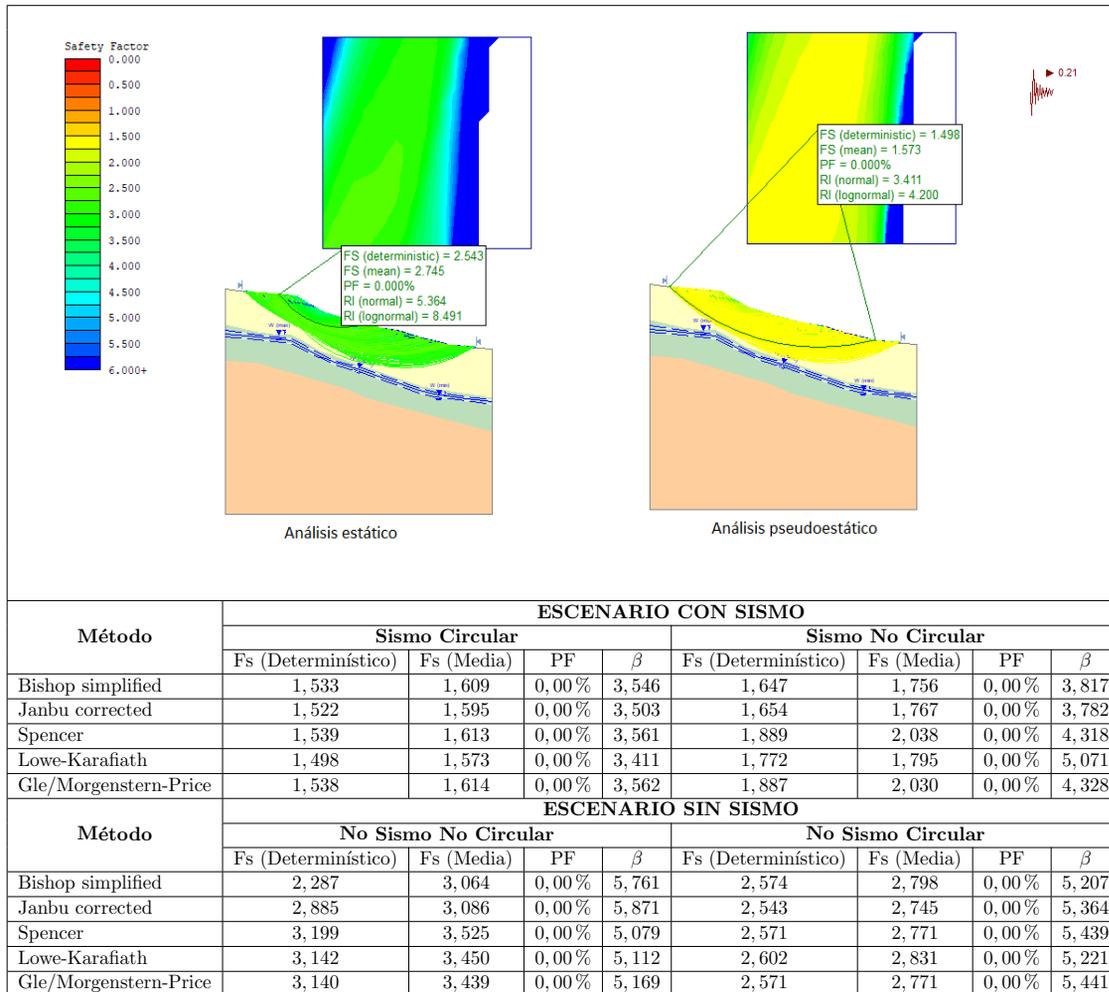
La construcción de este perfil recoge los cortes C1 y C2 propuestos inicialmente en el mapa de las unidades de ladera, esto debido a que se encontraban sobre una misma zona y los datos obtenidos para los materiales se representan de igual manera para ambos cortes. De esta manera, el corte C1 se construyó a partir de la perforación 9 y la información de la geología superficial realizada en Scoops3D sobre una zona de pendiente media en dirección SW. El perfil también se construyó en base a los resultados de amenaza obtenidos mediante Scoops3D y TRIGRS que indican una zona de amenaza baja-media, por lo que se hace necesario el estudio de estabilidad mediante el software Slide. Los materiales encontrados sobre la perforación solo contenía un limo de baja plasticidad compuesto por un 99,10 % de finos y 0,9 % en arena. Con estos datos el perfil arrojó los siguientes resultados para los distintos métodos evaluados en cada uno de los escenarios (sin sismo y con sismo).

Para el escenario con sismo y con un modo de falla circular se tiene que el factor de seguridad ( $FS$ ) mayor a 1,533 y en cada uno de los métodos evaluados la probabilidad de falla de la ladera es menor a 0,001 % sumado al índice de confiabilidad mayor a 3,411. Estos valores indican que independiente del tipo de falla y con un coeficiente de sísmico de 0,21 la zona que comprende el corte C1 se clasifica como de amenaza baja. De igual forma para un escenario más estable, es decir, sin un coeficiente de sismo se muestran valores superiores a 2,287 para el factor de seguridad en cada uno de los métodos y aumento en el índice de confiabilidad mayor a 5,079. En conclusión, el análisis realizado por Slide sobre el corte C1 muestra un nivel de amenaza baja para toda la ladera asociada a la zona SW del antiguo ETCR y no es necesario implementar algún tipo de obra de estabilidad.

### 12.8.2. Análisis de estabilidad para el corte C3

A partir del corte C3 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 P7 y el apique 11. En estos ensayos fueron encontrados un único material limoso de baja plasticidad de color café con arena, pero debido al tipo de ensayo se tienen dos valores distintos para el peso unitario de este tipo de material. En el trazado de este corte también se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos por Scoops3D y TRIGRS, en el primero se obtuvo que la ladera presenta una zona de amenaza media, mientras que para el segundo la

Tabla 80: Resultados de Slide para C1 y escenario más crítico

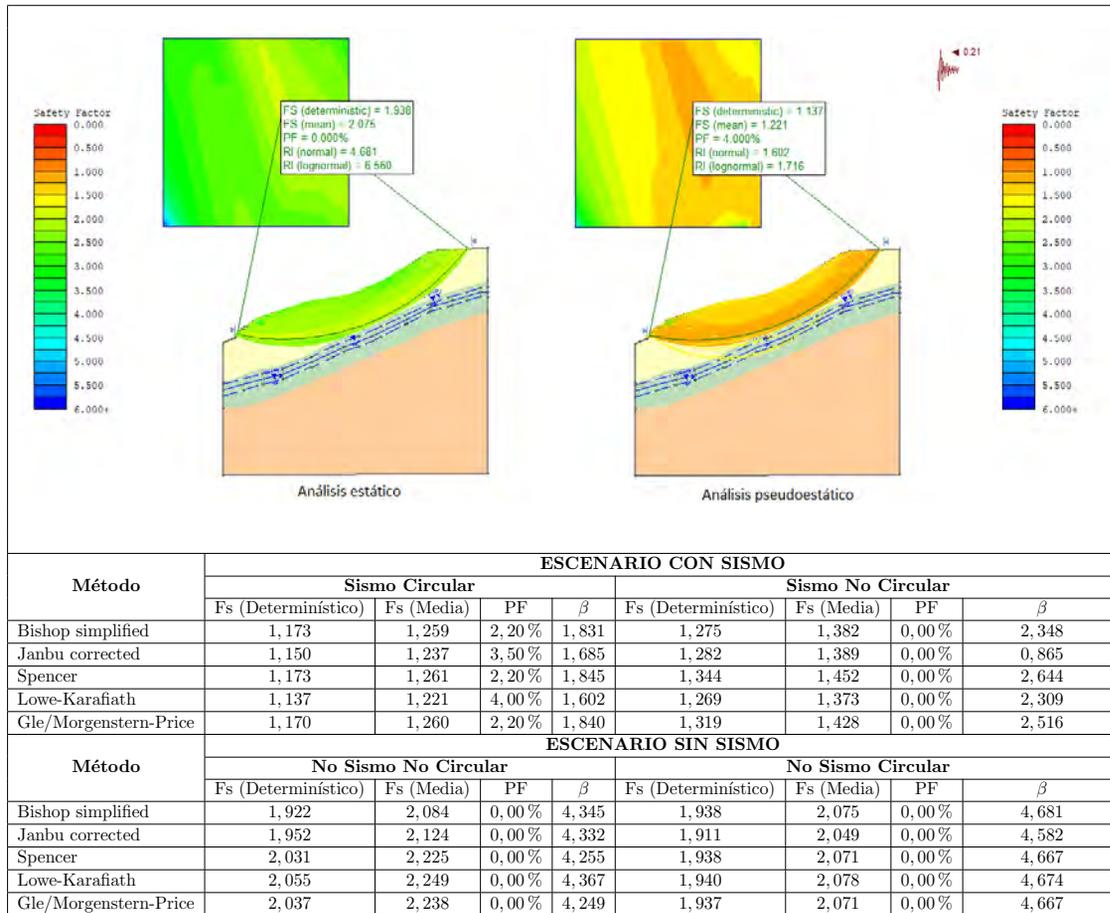


zona es de amenaza media-alta. De acuerdo a los criterios mostrados por los anteriores software se hizo necesario evaluar la estabilidad de esta ladera por medio de Slide, obteniendo los siguientes resultados.

Los resultados para determinar la estabilidad y el grado de amenaza del corte C3 arrojan que para un escenario sísmico con coeficiente de 0,21 y un tipo de falla circular el factor de seguridad es 1,137, cumpliendo con la norma. En cuanto al índice de confiabilidad para este escenario pseudoestático es mayor a 1,602 y la probabilidad de falla es menor al 5%. Para este mismo escenario pero variando el tipo de falla, el factor de seguridad aumenta a 1,275 y la probabilidad de falla es del 0%, determinando de esta manera que la zona presenta un grado de amenaza media-baja.

La ladera también se evaluó con un escenario sin sismo y los resultados obtenidos independiente del modo de falla (circular y no circular) arrojaron factores

Tabla 81: Resultados de Slide para C3 y escenario más crítico



de seguridad mayores a 1,5, es decir, cumplen con la norma. La probabilidad de falla es menor a 0,001% y el índice de confiabilidad es mayor a 4, esto permite concluir que en condiciones normales el nivel de amenaza para la ladera es baja. Debido a estas condiciones de amenaza baja, no es necesario la intervención con obras de estabilización en el corte C3.

### 12.8.3. Análisis de estabilidad para el corte C4

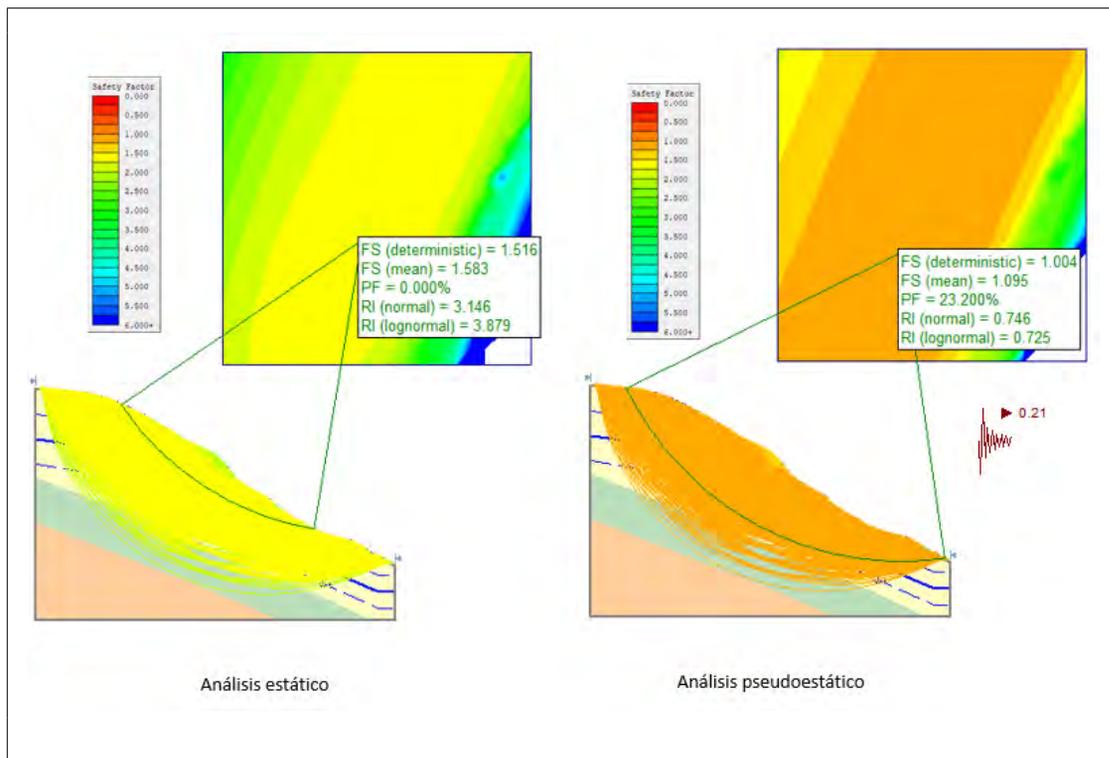
A partir del corte C4 se construyó el perfil correspondiente, el cual alcanza una longitud aproximada de 60m, buscando analizar la zona previamente definida como objeto de estudio, en la cual se tuvo en cuenta la perforación 5 y el apique 7, ubicada muy próxima a la zona superior del corte, lo cual es adecuado para la proximidad a la realidad de los parámetros de las muestras, además de la información utilizada en el software Scoops3D.

Desde 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 suelo residual, seguida de saprolito y finalmente arenisca.

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 82, muestran un factor de seguridad mínimo de 1, para los escenarios pseudoestáticos y factor de seguridad mínimo de 1,51 con probabilidad de falla de 0% para los escenarios estáticos. Por lo anterior se observa una ladera inestable para el escenario pseudoestático, pues el factor de seguridad no alcanza el valor adecuado.

Tabla 82: Resultados de Slide para C4 y escenario más crítico



Método	ESCENARIO CON SISMO							
	Sismo Circular				Sismo No Circular			
	Fs (Determinístico)	Fs (Media)	PF	$\beta$	Fs (Determinístico)	Fs (Media)	PF	$\beta$
Bishop simplified	1,04	1,09	24,3%	0,72	1,04	1,07	30,7%	0,53
Janbu corrected	1,00	1,09	23,2%	0,74	1,01	1,12	17,5%	0,91
Spencer	1,04	1,07	27,7%	0,61	1,06	1,08	24,5%	0,70
Lowe-Karafiath	1,03	1,09	22,8%	0,75	1,04	1,09	22,2%	0,77
Gle/Morgenstern-Price	1,04	1,04	40,3%	0,27	1,05	1,04	38,3%	0,33
Método	ESCENARIO SIN SISMO							
	No Sismo No Circular				No Sismo Circular			
	Fs (Determinístico)	Fs (Media)	PF	$\beta$	Fs (Determinístico)	Fs (Media)	PF	$\beta$
Bishop simplified	1,53	1,59	0%	3,19	1,52	1,58	0%	3,14
Janbu corrected	1,53	1,61	0%	3,23	1,52	1,59	0%	3,20
Spencer	1,54	1,62	0%	3,25	1,51	1,58	0%	3,15
Lowe-Karafiath	1,55	1,60	0%	3,21	1,52	1,59	0%	3,19
Gle/Morgenstern-Price	1,54	1,59	0%	2,95	1,52	1,58	0%	3,15

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 194) indican que el material y el nivel freático desestabilizan la ladera. Para este caso puntual se recomienda 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 2m de profundidad. Finalmente con estas recomendaciones se logra estabilizar la ladera, según los resultados arrojados por Slide.

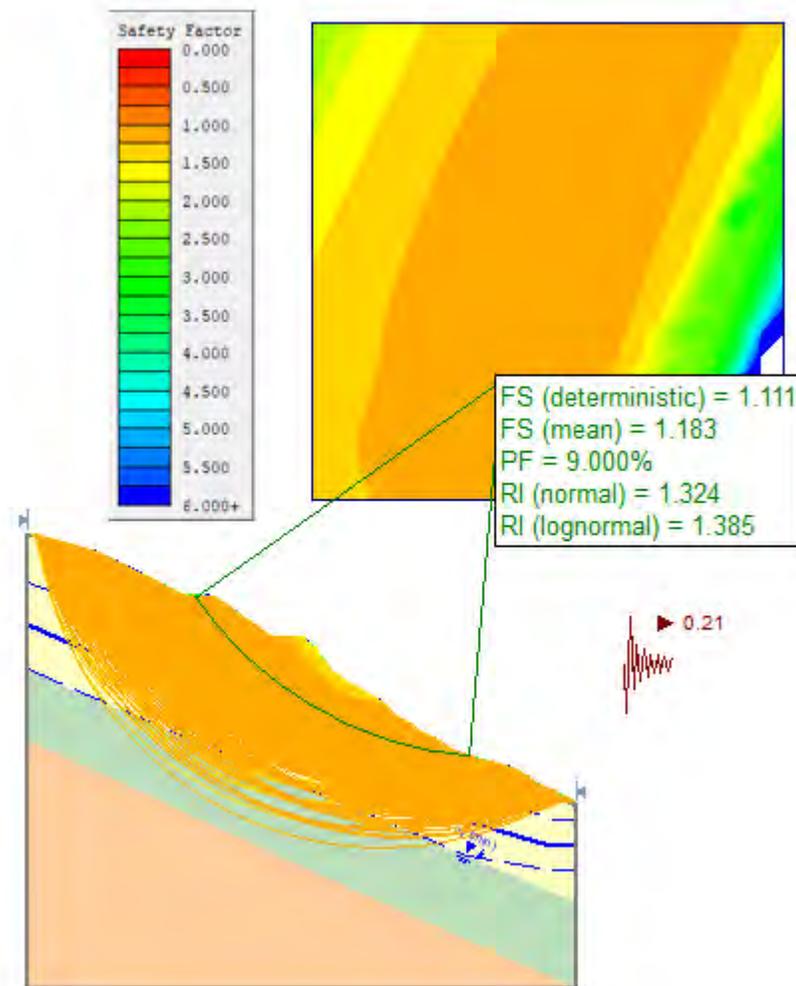


Figura 194: Perfil del corte C4 para escenarios más críticos con elaboración de terrazas y disminución del nivel freático para estabilizar la ladera

#### 12.8.4. Análisis de estabilidad para el corte C5

El corte 5 se realizó en una zona donde se muestra amenaza media en los resultados arrojados por los software Scoops3D Y TRIGRS. Este corte mide

aproximadamente 50 metros de longitud y la información del perfil fue tomada del apique 2 con sus correspondientes valores para los parámetros cohesión, ángulo de fricción y peso unitario de los materiales.

A partir del corte C5 se construyó el perfil correspondiente, el cual mide 50m de longitud aproximadamente, buscando analizar la zona previamente definida como objeto de estudio, en la cual se tomaron los parámetros geotécnicos obtenidos de la geología superficial propuesta por medio de las visitas de campo, el mismo que se usó para Scoops3D, además se tuvo en cuenta la información del apique 2. Luego 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 suelo residual, saprolito y arenisca.

Este corte fue trazado debido a los resultados arrojados por los software Scoops3D y TRIGRS donde se muestra amenaza media en esta zona. Sin embargo los resultados que arroja Slide, los cuales se observan en la Tabla 83, indican un factor de seguridad mínimo de 1,3 para el escenario pseudoestático y 1,7 para el escenario estático con probabilidad de falla de 0 %, lo que muestra una ladera estable.

Para los diferentes escenarios y sus respuestas en cuanto a los métodos estadísticos utilizados en Slide se evidencia factores de seguridad adecuados, lo que indica estabilidad en el talud, por tal motivo no se realizan consideraciones o recomendaciones.

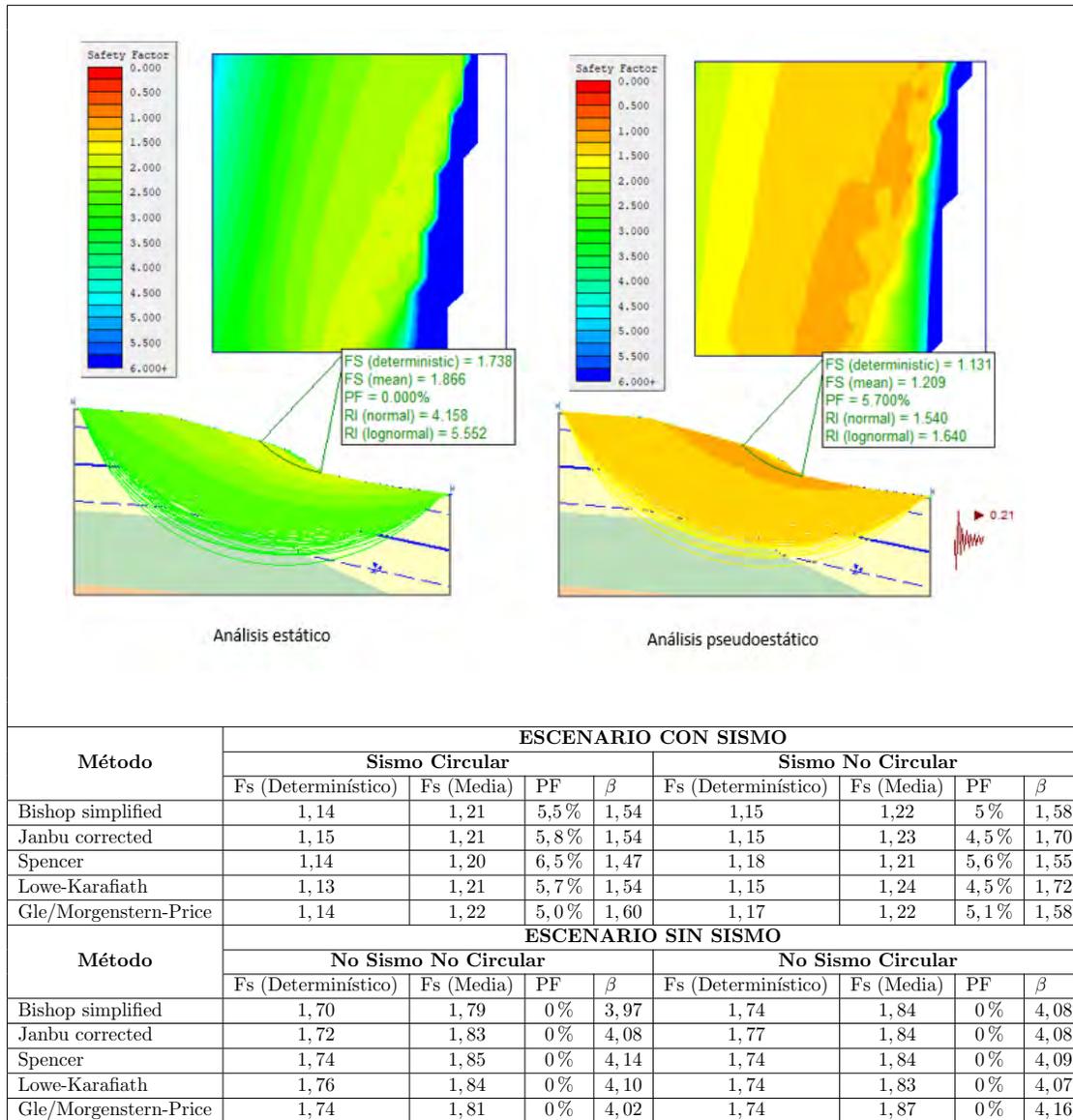
#### **12.8.5. Análisis de estabilidad para el corte C6**

A partir del corte C6 se construyó el perfil correspondiente, el cual alcanza una longitud aproximada de 40m, buscando analizar la zona previamente definida como objeto de estudio, en la cual se tuvo en cuenta el apique 4, además de la información utilizada en el software Scoops3D.

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 suelo residual, seguida de saprolito y finalmente arenisca.

Este corte fue trazado debido a los resultados arrojados por los software Scoops3D y TRIGRS donde se muestra un polígono de amenaza alta. Los resultados que arroja Slide, los cuales se observan en la Tabla 84, muestran un factor de seguridad mínimo de 0,91, para los escenarios pseudoestáticos y factor de seguridad mínimo de 1,31 con probabilidad de falla de 0 % para los escena-

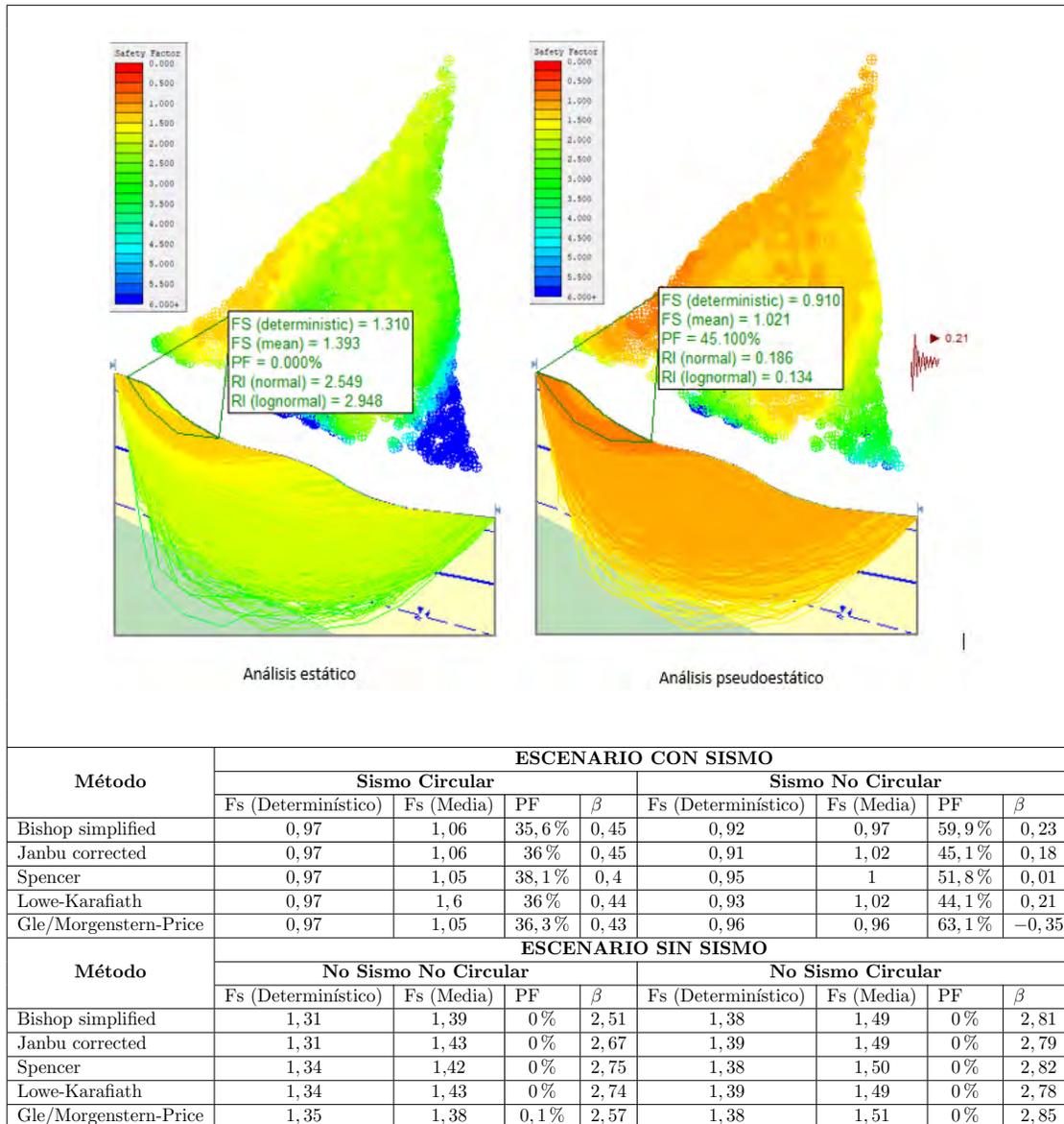
Tabla 83: Resultados de Slide para C5 y escenario más crítico



rios 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 195) indican que el material desestabilizan la ladera. Para este caso puntual se recomienda realizar terrazas que cuenten con un diseño previo. Finalmente con estas recomendaciones se logra estabilizar la ladera, según los resultados arrojados por Slide.

Tabla 84: Resultados de Slide para C6 y escenario más crítico



### 12.8.6. Análisis de estabilidad para el corte C7

A partir del corte C7 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 P4, ubicada a 24m al noroccidente del punto más bajo del perfil correspondiente. Para dicha perforación se realizó la extracción de dos muestras, que posteriormente fueron utilizadas para los diferentes ensayos de laboratorio, para los cuales se incluyen los parámetros geotécnicos en el software Slide, como parte de los dos primeros horizontes de suelo, hasta los 3m de profundidad registrados en la perforación y materiales analizados. Para

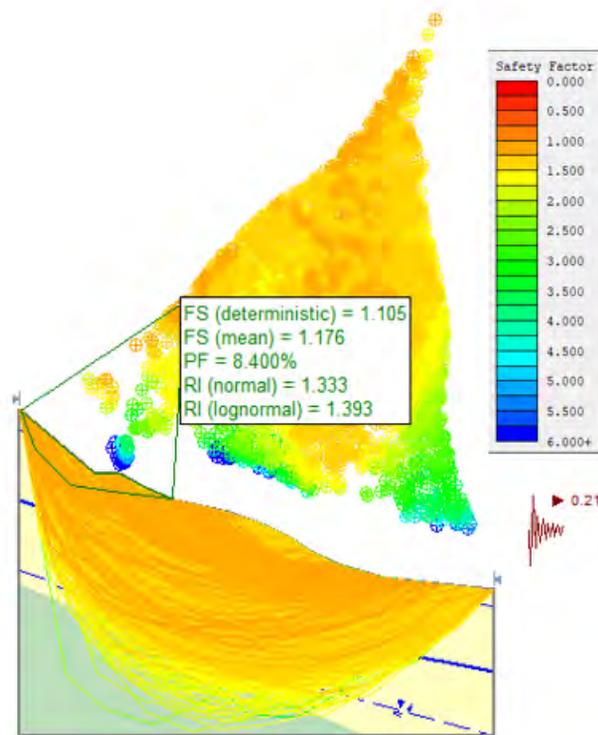


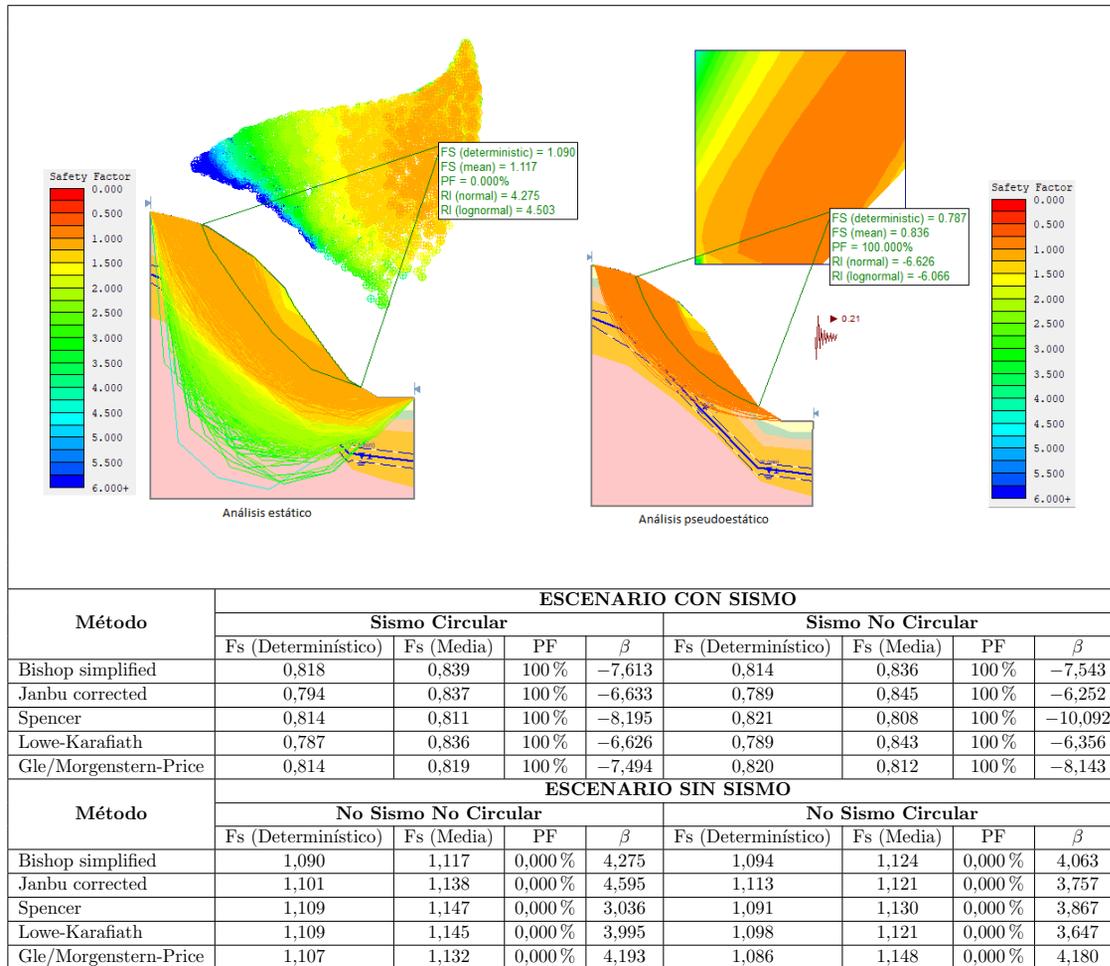
Figura 195: Perfil del corte C6 para escenarios más críticos con elaboración de terrazas para estabilizar la ladera

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 1, en la cual se ubica el corte espacialmente.

Los resultados del modelo Scoops3D evidencian que la zona está inmersa en amenaza media, mientras que para TRIGRS se tienen varios pequeños polígonos con amenaza alta. 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 se obtienen  $PF$  del 100% asociadas a  $FS$  inferiores a 0,84 para todos los escenarios y metodologías en condiciones pseudoestáticas, adicionalmente para escenarios estáticos se obtienen  $FS$  muy cercanos a 1, aunque con  $PF$  del 0% (ver Tabla 85).

Al ser una zona con tan altas probabilidades de falla, es necesario recomendar la realización de obras de remediación en el talud. Por medio del software Slide, se evaluaron los distintos escenarios teniendo en cuenta variaciones en el nivel freático y la construcción de terrazas sobre el talud, buscando reducir las  $PF$  resultantes del modelo. Se demostró que la instalación de filtros o drenajes

Tabla 85: Resultados de Slide para C7 y escenario más crítico con sismo y sin sismo



que permitan disminuir el nivel freático, no es una obra eficiente para conseguir bajas probabilidades de falla, de igual forma la construcción de terrazas también resultó ser insuficiente para estabilizar el terreno, es por esto que se procedió a realizar las modelaciones incluyendo un sistema de anclajes en el talud, lo cual demostró ser efectivo para reducir las *PF*, llegando a *FS* mayores a 1,08 incluso para el escenario más crítico, tal como se observa en la Figura 196. Finalmente, partiendo de los resultados arrojados por Slide, se recomienda la instalación de un sistema de anclajes en la zona, los cuales resultan ser eficientes, según el modelo, con longitudes de 18m, inclinación de 20° y un espaciamiento aproximado de 2m, sin embargo es necesario el análisis detallado de esta obra y su diseño correspondiente.

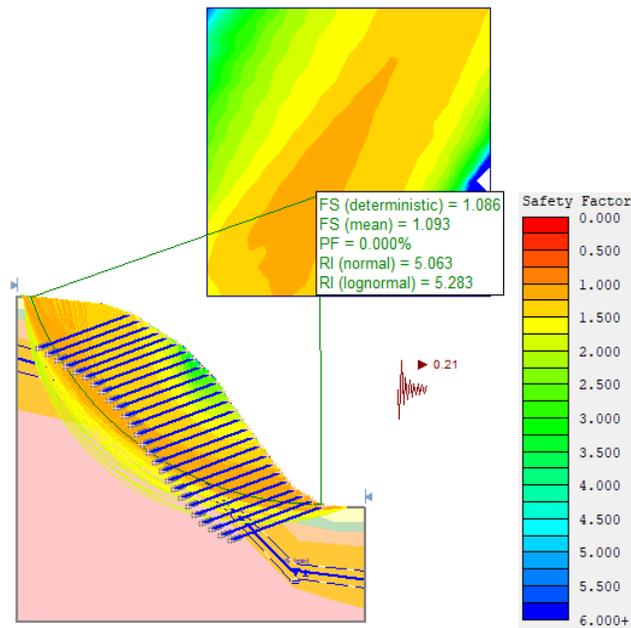


Figura 196: Perfil del corte C7 con anclajes.

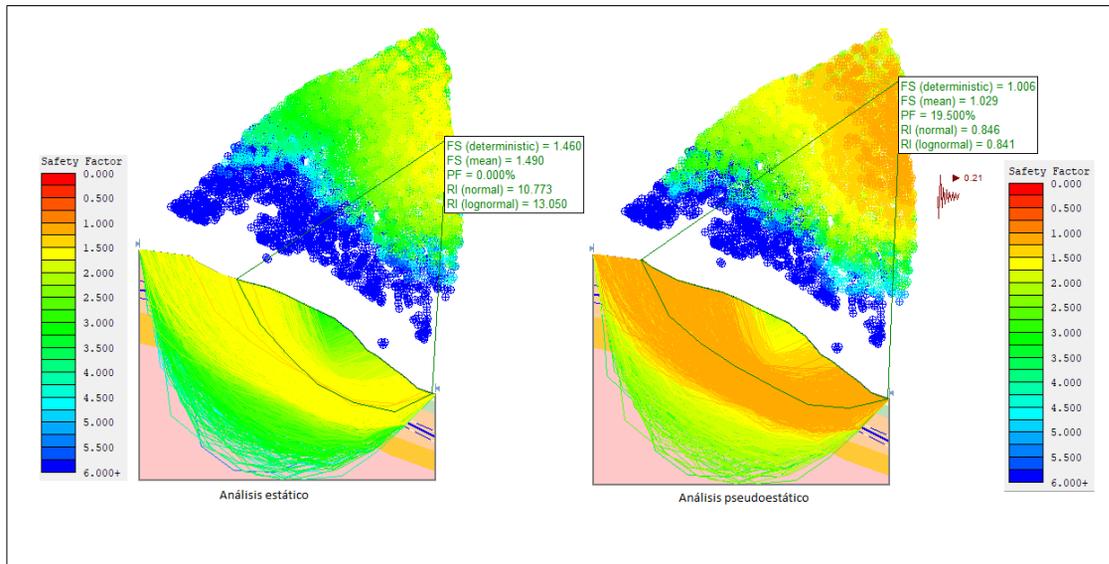
### 12.8.7. Análisis de estabilidad para el corte C8

A partir del corte C8 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 P8, ubicada a 47m del punto más alto del perfil. Para esta perforación se realizaron los ensayos de laboratorio en dos muestras, para las cuales se incluyen en Slide todos los parámetros geotécnicos resultantes, como parte de los dos primeros horizontes de suelo, hasta los 3m 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 1, en la cual se ubica el corte espacialmente.

Según los resultados arrojados por el modelo TRIGRS, en la zona hay influencia de un polígono de amenaza alta. Además, a partir de las interpretaciones heurísticas realizadas en la visita al antiguo ETCR La Fila, se identifica un punto de control cercano al corte, dándole una mayor importancia a la necesidad de analizar la zona, ya que se tienen indicios que pueden representar alguna probabilidad de falla. El análisis de los métodos estudiados y los diferentes escenarios mediante el software Slide, permiten entender la zona analizada como

de amenaza media, ya que se obtienen  $FS$  muy cercanos a 1,05 para escenarios pseudoestáticos y a 1,5 en condiciones estáticas, con  $PF$  de hasta el 19,5 % que indican una amenaza media que puede ser sobrepasada cuando se tiene influencia de movimientos sísmicos (ver Tabla 86).

Tabla 86: Resultados de Slide para C8 y escenario más crítico con sismo y sin sismo.



Método	ESCENARIO CON SISMO							
	Sismo Circular				Sismo No Circular			
	Fs (Determinístico)	Fs (Media)	PF	$\beta$	Fs (Determinístico)	Fs (Media)	PF	$\beta$
Bishop simplified	1,045	1,067	3,100 %	1,907	1,006	1,029	19,500 %	0,846
Janbu corrected	1,022	1,075	1,800 %	2,151	1,016	1,113	0,000 %	3,234
Spencer	1,051	1,054	6,700 %	1,532	1,091	1,035	11,458 %	1,156
Lowe-Karafiath	1,030	1,073	1,800 %	2,098	1,025	1,090	0,000 %	2,620
Gle/Morgenstern-Price	1,049	1,036	12,400 %	1,133	1,059	1,041	12,800 %	1,117
Método	ESCENARIO SIN SISMO							
	No Sismo No Circular				No Sismo Circular			
	Fs (Determinístico)	Fs (Media)	PF	$\beta$	Fs (Determinístico)	Fs (Media)	PF	$\beta$
Bishop simplified	1,460	1,490	0,000 %	10,773	1,547	1,580	0,000 %	11,746
Janbu corrected	1,501	1,550	0,000 %	11,608	1,561	1,583	0,000 %	11,822
Spencer	1,528	1,679	0,000 %	13,171	1,545	1,613	0,000 %	12,324
Lowe-Karafiath	1,646	1,537	0,000 %	11,477	1,580	1,580	0,000 %	11,778
Gle/Morgenstern-Price	1,511	1,536	0,000 %	10,866	1,548	1,602	0,000 %	10,916

Teniendo en cuenta la clasificación inicial de la zona como de amenaza alta y los resultados arrojados por Slide, se procedió a la modelación del escenario más crítico (sismo no circular) con una disminución en el nivel freático, buscando reducir las probabilidades de falla e incrementar el  $FS$ . Se encontró que disminuyendo el nivel freático en al menos 8m, se logran obtener  $FS$  mayores a 1,18 y  $PF$  del 0 %, como se observa en la Figura 197. Por lo tanto, como obra de remediación se recomienda instalar un sistema de filtros o drenajes superficiales o subsuperficiales que permitan la evacuación del recurso hídrico hasta reducir 8m el nivel freático, para finalmente poder considerar la zona estable según el análisis de Slide.

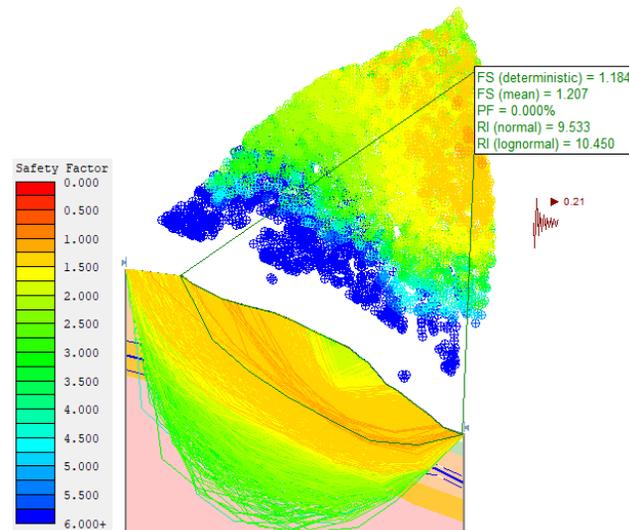


Figura 197: Perfil del corte C8 con disminución del nivel freático.

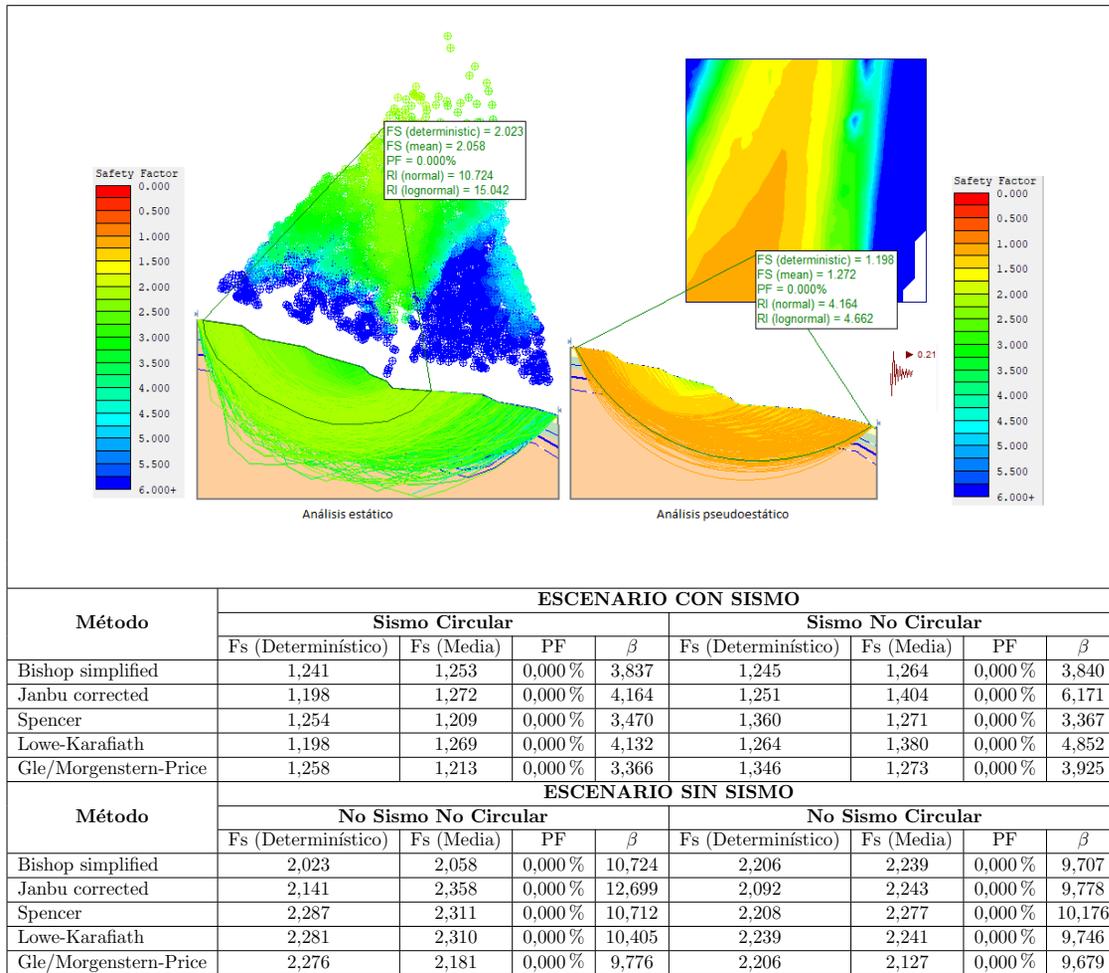
### 12.8.8. Análisis de estabilidad para el corte C9

Los resultados que arrojaron los ensayos de laboratorio realizados a los tres materiales extraídos de la perforación PTAR2, fueron incluidos en el software Slide, como parte de los primeros horizontes de suelo, hasta los 3m 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 1, en la cual se ubica el corte espacialmente.

Según el mapa de amenaza obtenido por Scoops3D, la zona representada por el corte C9 se encuentra en amenaza media, mientras que para TRIGRS existe una probabilidad de falla superior en algunos puntos específicos a lo largo del corte, adicionalmente la zona fue identificada en la visita al antiguo ETCR La Fila, como un punto de control, ubicándola finalmente como objeto para el análisis de estabilidad.

Para los modelos procesados en Slide, con las diferentes metodologías y escenarios estudiados, el terreno se encuentra sin probabilidades de falla, dando lugar a una interpretación de la zona como de amenaza baja, ya que los  $FS$  siempre son superiores a 1,2 y se encuentran asociados a índices de confiabilidad ( $\beta$ ) superiores a 3,3 e incluso hasta de 12,7 en condiciones estáticas (ver Tabla 87). Finalmente, no se considera necesaria la realización de obras de remediación por las razones descritas anteriormente.

Tabla 87: Resultados de Slide para C9 y escenario más crítico con sismo y sin sismo.



### 12.8.9. Análisis de estabilidad para el corte C10

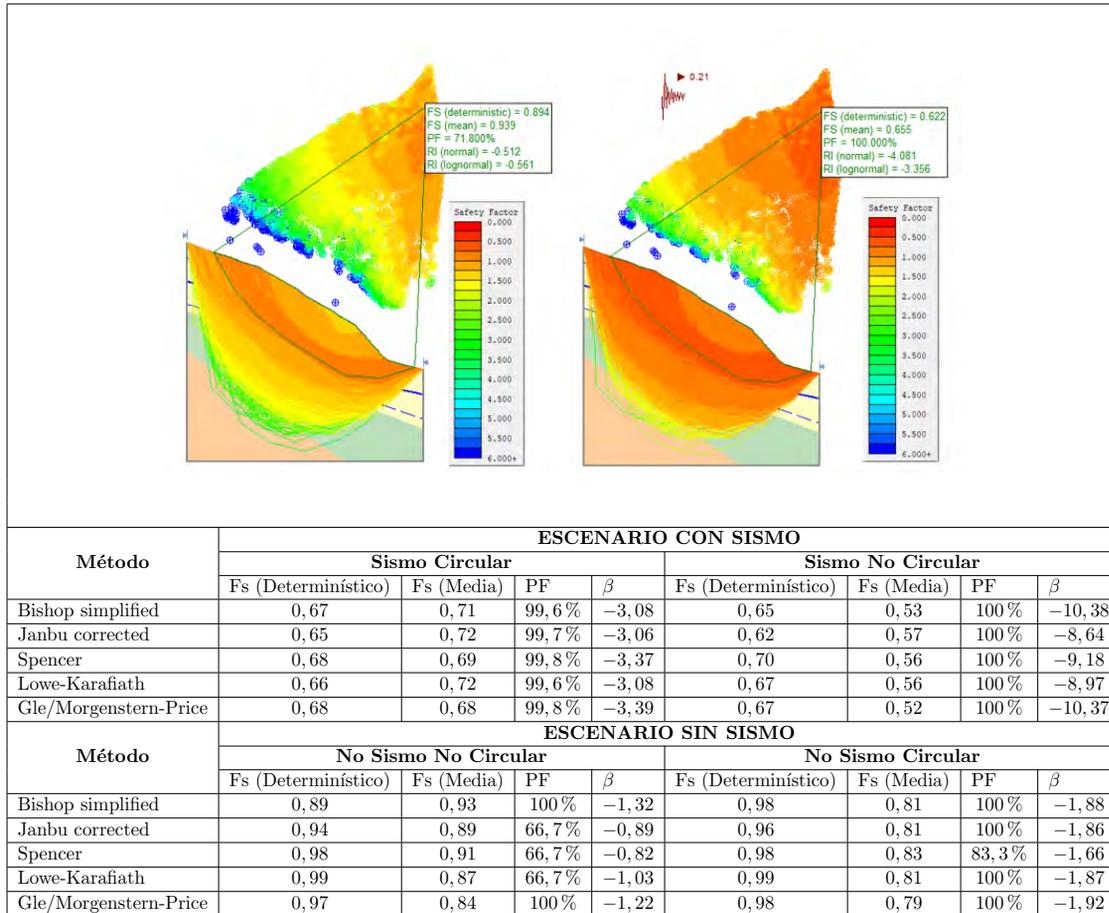
A partir del corte C10 se construyó el perfil correspondiente, el cual alcanza una longitud aproximada de 47m, buscando analizar la zona previamente definida como objeto de estudio. Para la realización del perfil se tuvo en cuenta la geología superficial de la zona y la información utilizada en el software Scoops3D.

De acuerdo con 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 suelo residual, seguida de saprolito y finalmente arenisca.

Este corte fue trazado debido a los resultados arrojados por los software Scoops3D y TRIGRS donde se muestra un polígono de amenaza alta. Los resultados que arroja Slide, los cuales se observan en la Tabla 88, muestran un

factor de seguridad mínimo de 0,62, para los escenarios pseudoestáticos y factor de seguridad mínimo de 0,89 para los escenarios estáticos, lo que indica una ladera inestable para ambos escenarios, pues ningún factor de seguridad alcanza el valor adecuado.

Tabla 88: Resultados de Slide para C10 y escenario más crítico



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 198) indican que el material y el nivel freático desestabilizan la ladera, sin embargo no se logró modificar el nivel freático ya que se requiere drenes de más de 20m de longitud. Para este caso puntual se recomienda realizar terrazas que cuenten con un diseño previo y la presencia de vegetación que puedan ayudar a la estabilidad de la zona. Finalmente con estas recomendaciones se logra estabilizar la ladera, según los resultados arrojados por Slide.

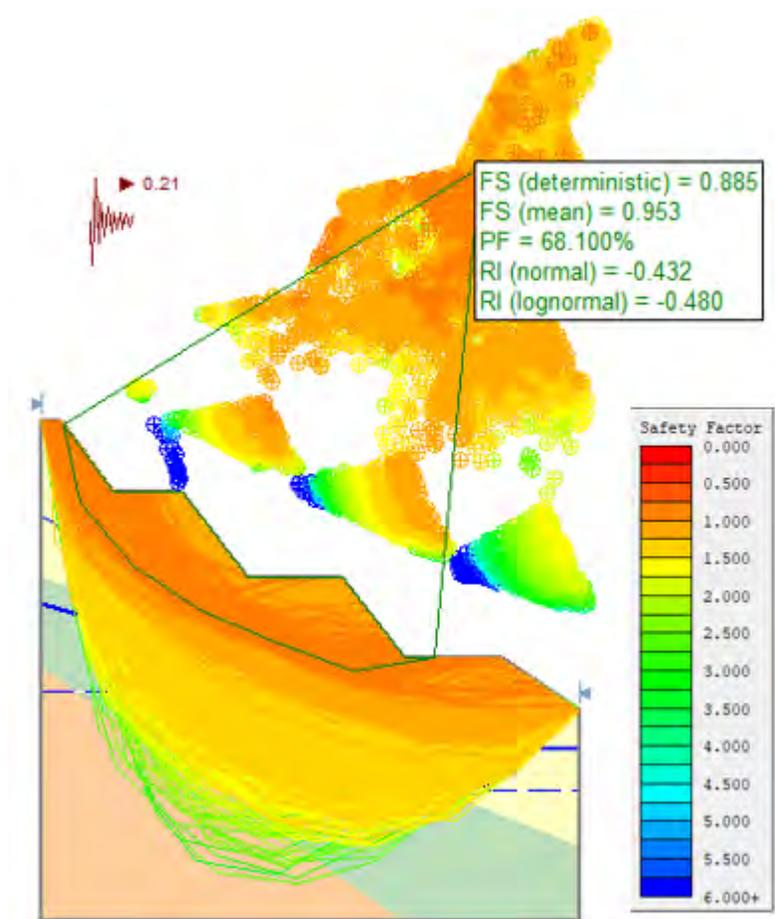


Figura 198: Perfil del corte C10 para escenarios más críticos con propuesta de terrazas

# Referencias

- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2009). AIS.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). AIS.
- 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=42r6CKatuwcC>
- 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 Vallejo, L. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación. Descargado de <https://books.google.com.co/books?id=mPD40wAACAAJ>
- 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. (2002). Compilación Geológica y Fotogeología de la plancha 265 Ñcononzo. Escala 1:100.000. , 1-84.
- 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 micro-tremor 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. (2017). *Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25000*. doi: 10.1002/chem.201301917
- SGC, S. G. (2015). *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

### Introducción

Se realiza la zonificación de amenaza por inundación para el antiguo ETCR de La Fila a partir de los resultados de simulaciones hidrodinámicas bidimensionales llevadas a cabo con ayuda del modelo digital de elevación de alta resolución (0,5 m de tamaño de píxel). Los resultados de calado y velocidad total de flujo son exportados con la misma resolución del modelo de elevación digital desde el software de simulación, para posteriormente clasificar y zonificar los diferentes niveles de amenaza (baja, media y alta). El caudal de simulación se obtiene a partir de las descargas máximas estimadas para 500 años de período de retorno calculadas en el capítulo de Amenaza por inundación en el apartado de Estudios Básicos y teniendo en cuenta el potencial volumen de sólidos calculados en el capítulo de Amenaza por avenidas torrenciales en el apartado de Estudios Básicos. En la Figura 199 se muestra un diagrama con el procedimiento desarrollado para llevar a cabo dicha zonificación. Las zonas que se encuentran sujetas a la ocurrencia de inundaciones en el área de estudio son todos los cauces allí presentes, así como sus zonas aledañas. En este estudio se analiza la amenaza por inundación asociada a las corrientes que se encuentran colindando el antiguo ETCR y al interior de éste que consta básicamente de tres corrientes. En la Figura 200 se presentan las corrientes del antiguo ETCR La Fila.

### 13.1. Descripción del modelo hidrodinámico bidimensional

Para llevar a cabo la simulación hidrodinámica se utiliza el software IBER, el cual es uno de los modelos bidimensionales mayormente empleados y con licencia libre. El módulo hidrodinámico de IBER resuelve las ecuaciones de Saint

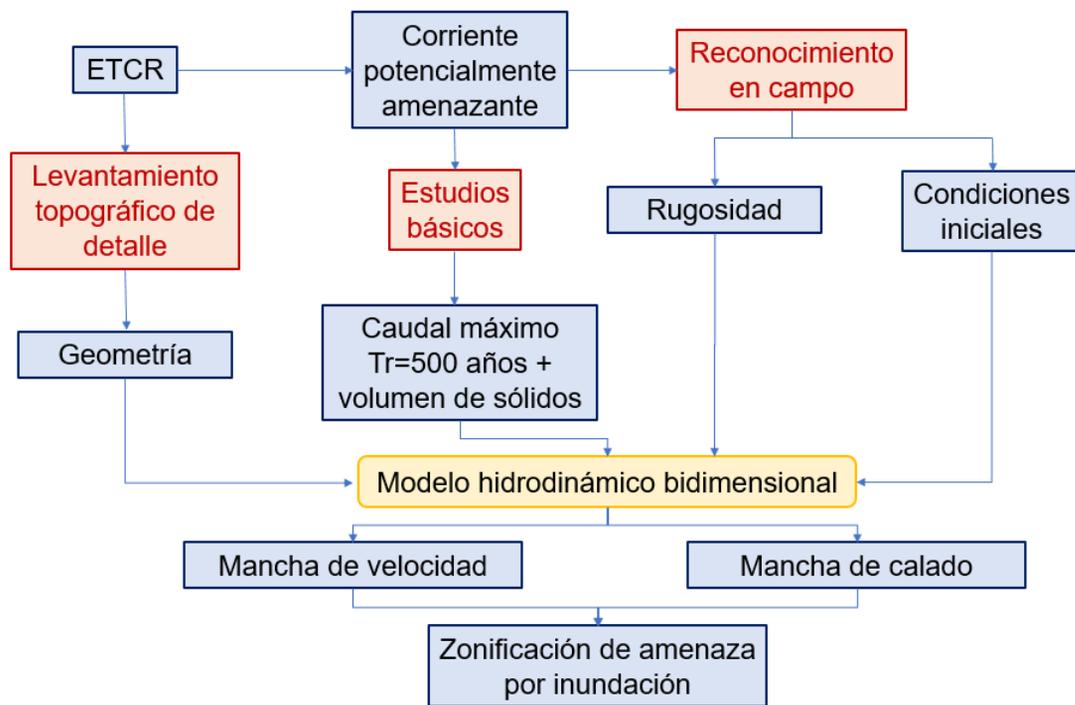


Figura 199: Procedimiento para zonificación de amenaza por inundación

Venant bidimensionales, incorporando los efectos de la turbulencia y rozamiento superficial por viento a partir de un modelo numérico de volúmenes finitos. A continuación, se presentan las ecuaciones constitutivas de conservación de masa y momentum:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU_x}{\partial x} + \frac{\partial hU_y}{\partial y} &= 0 \\
 \frac{\partial}{\partial t}(hU_x) + \frac{\partial}{\partial x} \left( hU_x^2 + g\frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (hU_xU_y) \\
 &= -gh\frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_t h \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_t h \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) \\
 \frac{\partial}{\partial t}(hU_y) + \frac{\partial}{\partial y} \left( hU_y^2 + g\frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hU_xU_y) \\
 &= -gh\frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_t h \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_t h \frac{\partial U_y}{\partial y} \right)
 \end{aligned} \tag{13.1}$$

Donde  $h$  es el calado,  $U_x$ ,  $U_y$  son las velocidades horizontales promediadas en profundidad,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $\rho$  es la densidad del agua,  $z_b$  es la cota del fondo,  $\tau_x$  es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento,  $\tau_b$  es la fricción debida al rozamiento del fondo

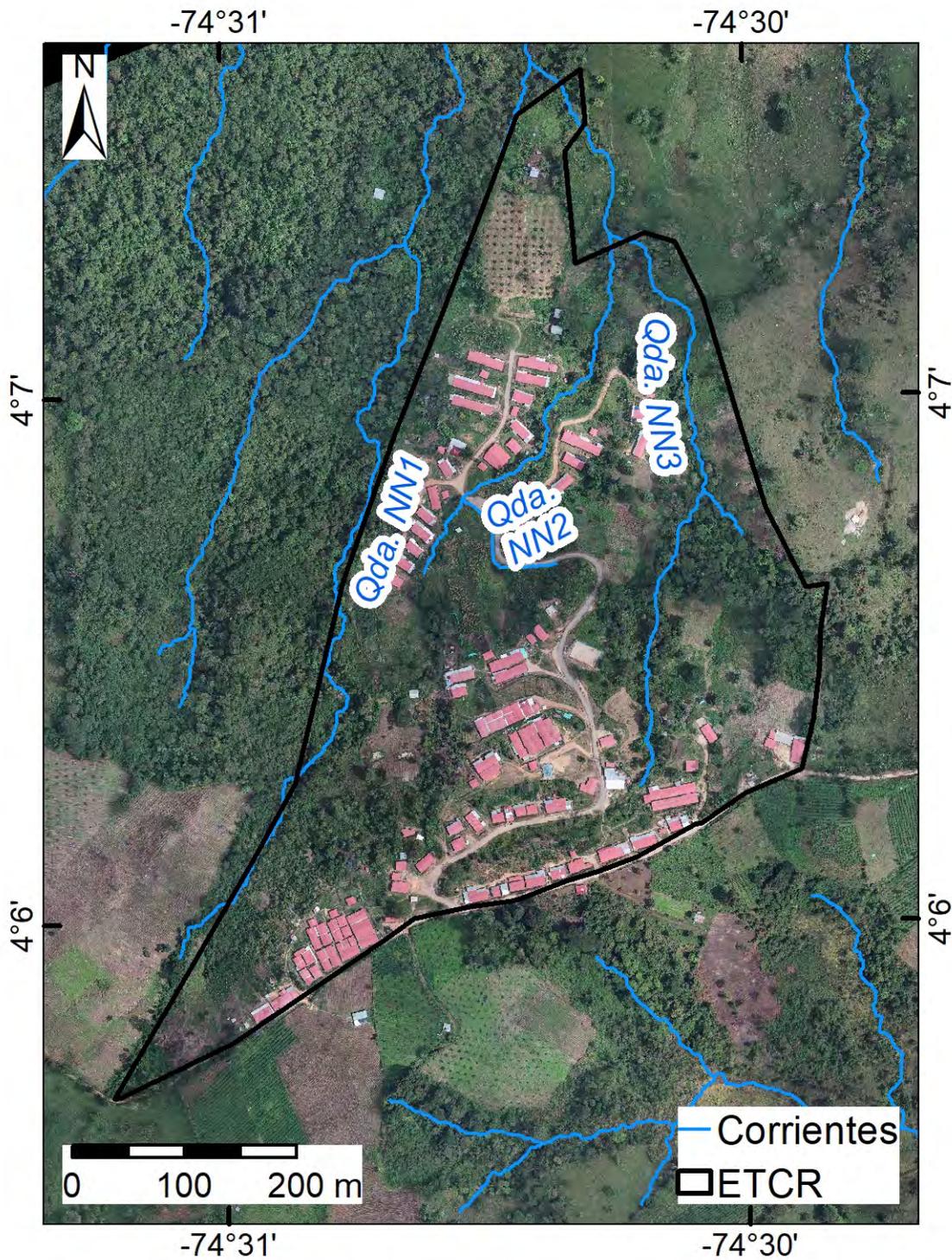


Figura 200: Corrientes antiguo ETCR La Fila

y  $\nu_t$  es la viscosidad turbulenta (Bladé y cols., 2014). Es necesario ingresar los parámetros de: caudal de entrada en cada corriente objeto de estudio, rugosidad según la superficie y condiciones iniciales y de borde en caso de conocerse. A

continuación, se describen los diferentes parámetros de entrada del modelo.

### 13.1.1. Caudales de simulación

A continuación, en la Tabla 89 se presenta un resumen con los caudales de simulación para cada una de las corrientes objeto de estudio. El área de drenaje estimada en el punto de salida para garantizar que se esté simulando el escenario más crítico.

Tabla 89: Caudales de simulación - inundaciones

Corriente	Área de drenaje (m <sup>2</sup> )	Q máx 500 años (m <sup>3</sup> /s)
NN1	768304	5,3
NN2	309338	2,1
NN3	358407	2,5

### 13.1.2. Rugosidad

Los valores del coeficiente de fricción del cauce vienen dados por la resistencia al flujo ejercida por los sedimentos que conforman el lecho y las márgenes de las quebradas del área de influencia, así como por la cobertura vegetal. La estimación del coeficiente de rugosidad de Manning del cauce se hace de acuerdo de Cowan modificado (Arcement, G.J., Schneider, 1989), el cual se basa en la estimación de un valor inicial de la rugosidad y su posterior modificación según valores correctores y expresa el valor final de  $n$  de Manning como:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m \quad (13.2)$$

donde:

- $n$  coeficiente de rugosidad del cauce
- $n_0$  rugosidad debida a los materiales del cauce
- $n_1$  rugosidad debida a la irregularidad del cauce a lo largo del tramo
- $n_2$  rugosidad debida a las variaciones de la sección transversal a lo largo del tramo
- $n_3$  rugosidad debida al efecto de las obstrucciones a lo largo del tramo
- $n_4$  rugosidad debida a la presencia de vegetación a lo largo del tramo

- *m* rugosidad debida a la sinuosidad del tramo

Los diferentes valores de las rugosidades propuestos por Cowan se muestran en la Tabla 90. La asignación de estos valores para cada uno de los cauces se hizo a partir de observaciones en las visitas de campo y el uso de la fotografía aérea.

Tabla 90: Valores de referencia para coeficiente de rugosidad de Manning

Condiciones		Descripción	Val.n
Material	Tierra	Cauce en arcilla	0,02
	Roca	Cauce en roca	0,025
	Grava fina	Cauce en grava	0,024
	Grava gruesa		0,028
Irregularidad	Baja	Canal liso	0,000
	Menor	Excavado en buenas condiciones	0,005
	Moderada	Presencia de erosión	0,001
	Alta	Canal en malas condiciones	0,002
Variaciones en la S. Transversal	Gradual	Casi uniforme	0,000
	Ocasionales	Contracciones y expansiones infrecuentes	0,005
	Frecuentes	Contracciones y expansiones frecuentes	0,0015
Efecto de obstrucciones	Pequeño	Ocupan menos del 5 % del cauce	0,000
	Menor	Ocupan entre el 5 % y el 15 % del cauce	0,010
	Apreciable	Ocupan entre el 15 % y el 50 % del cauce	0,020
	Alto	Ocupan más del 50 % del cauce	0,040
Vegetación	Baja	$D > 3$ veces altura de vegetación	0,005
	Media	$D$ entre 1 y 3 veces altura de vegetación	0,01
	Alta	$D =$ altura de vegetación	0,025
	Muy Alta	Altura de vegetación es $2 * D$	0,05
Sinuosidad	Menor	Sinuosidad entre 1,0 y 1,2	1,00
	Apreciable	Sinuosidad entre 1,2 y 1,5	1,15
	Alta	Sinuosidad $> 1,5$	1,30

En las llanuras de inundación y demás zonas potencialmente inundables, el coeficiente de rugosidad de Manning se asignó teniendo en cuenta el uso del suelo propuesto por Chow, Maidment, y Mays (1994).

### 13.1.3. Condiciones de borde y condiciones iniciales

Para el caso de las simulaciones llevadas a cabo en el antiguo ETCR, las condiciones de borde aguas arriba están sujetas al caudal de entrada y a las condiciones de geometría y rugosidad previamente definidas, aguas abajo, no hay necesidad de implementar un control tipo elevación de superficie libre. Las condiciones iniciales para las tres corrientes simuladas corresponden a un calado de 0,1 m por tratarse de nacimientos.

### 13.2. Categorización de amenaza por inundación

Para la zonificación de amenaza por inundación se tiene en cuenta la información disponible para cada corriente producto de la simulación, específicamente los resultados de la distribución espacial de la velocidad y la profundidad de flujo y el producto de ambas variables. la categorización de la amenaza se realiza teniendo en cuenta los niveles de amenaza propuestos por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de Estados Unidos FEMA (2014) la cual categoriza la amenaza por inundaciones de acuerdo a la profundidad del flujo, la velocidad de éste y el producto de estas dos variables como amenaza baja, media, alta, muy alta y extrema; en este caso los niveles de amenazas muy alta y extrema se incluyeron en la categoría alta, quedando únicamente tres posibles niveles de amenaza: baja, media y alta, como se muestra en la Figura 201.

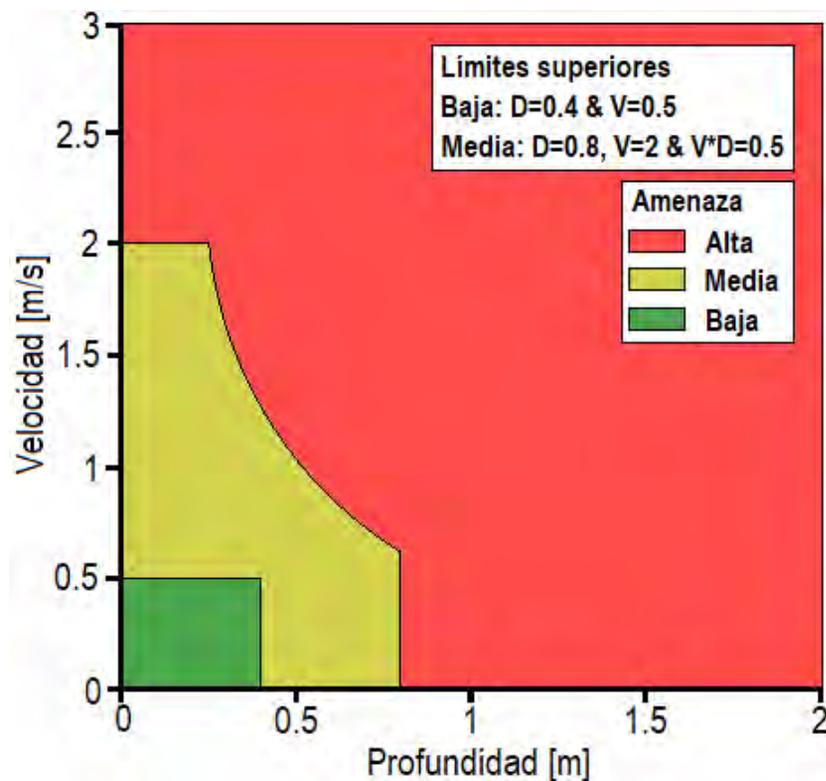


Figura 201: Categorización de amenaza por inundaciones

### 13.3. Resultados

Se presentan los resultados obtenidos de las variables hidráulicas necesarias para la zonificación de amenaza por inundación. En la Figura 202 se muestra la espacialización de la profundidad, mientras que en la Figura 203 se muestran

los resultados de distribución espacial de la velocidad de flujo. Finalmente, en la Figura 204 se muestra la zonificación de amenaza por inundación para el antiguo ETCR La Fila en los tres niveles (alta, media y baja).

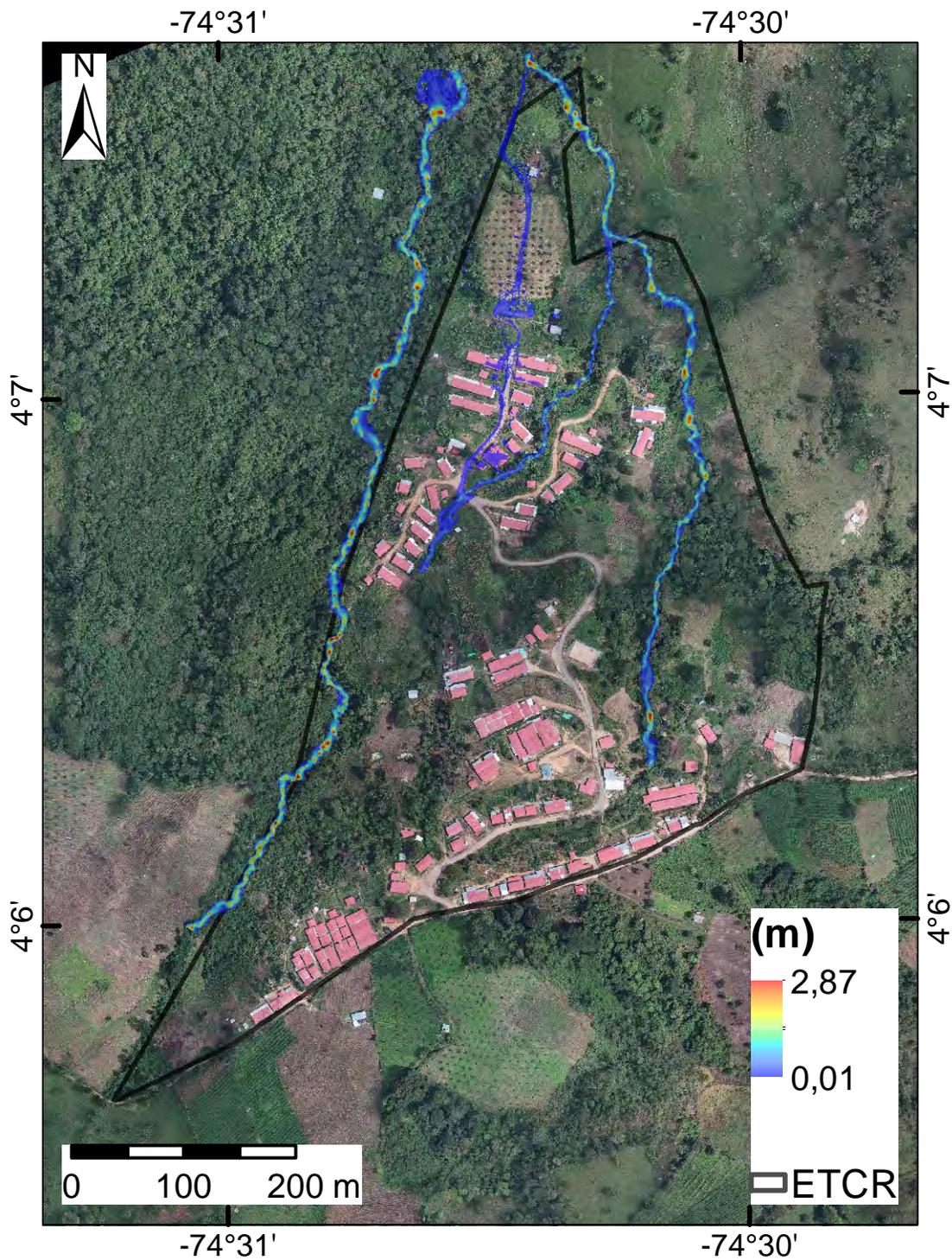


Figura 202: Distribución espacial del calado

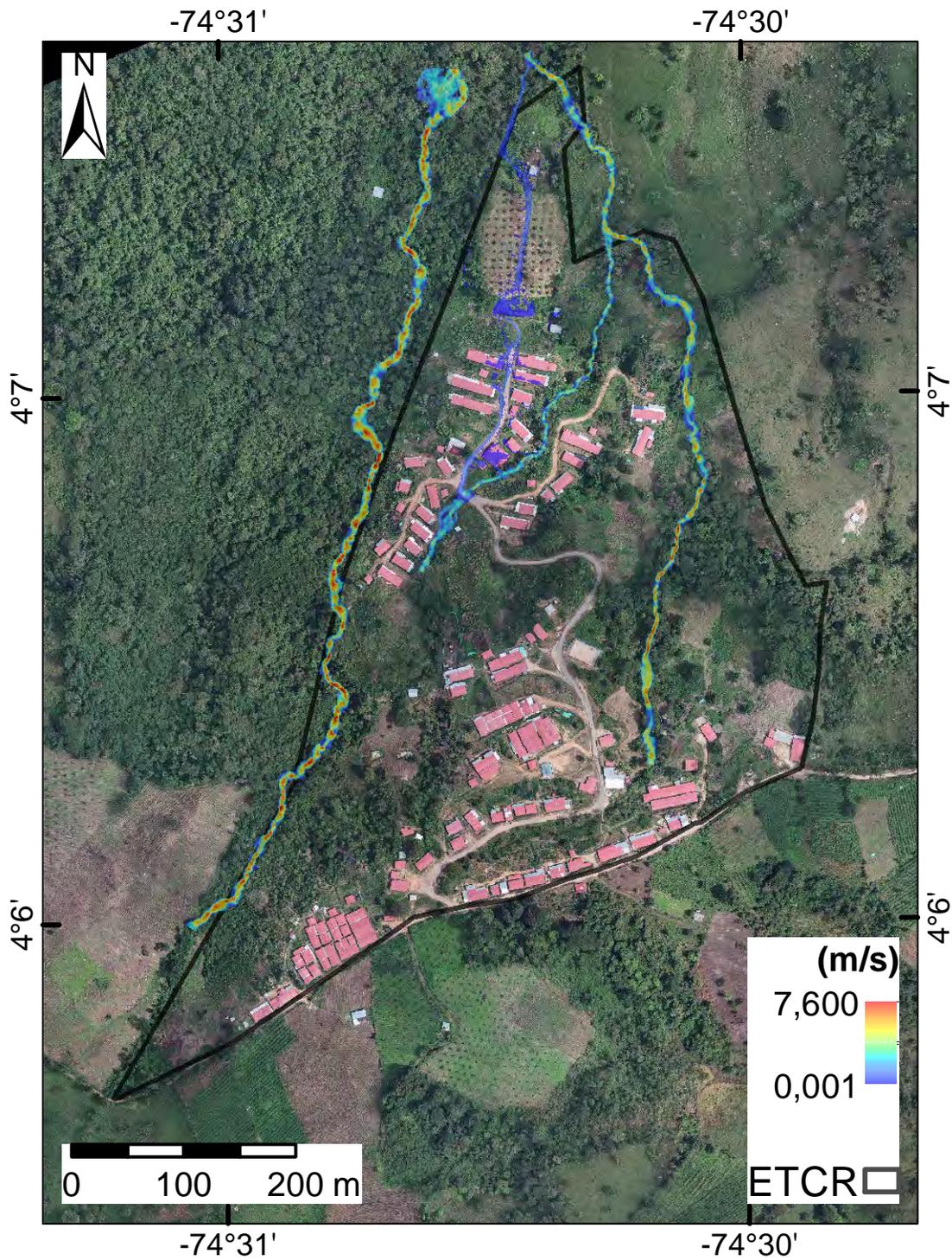


Figura 203: Distribución espacial de la velocidad

En un evento extremo de inundación con máxima concentración de sólidos en suspensión, asociado además a un período de retorno de 500 años se tienen calados de hasta 2,87 m, estas profundidades se ubicarían al exterior del antiguo

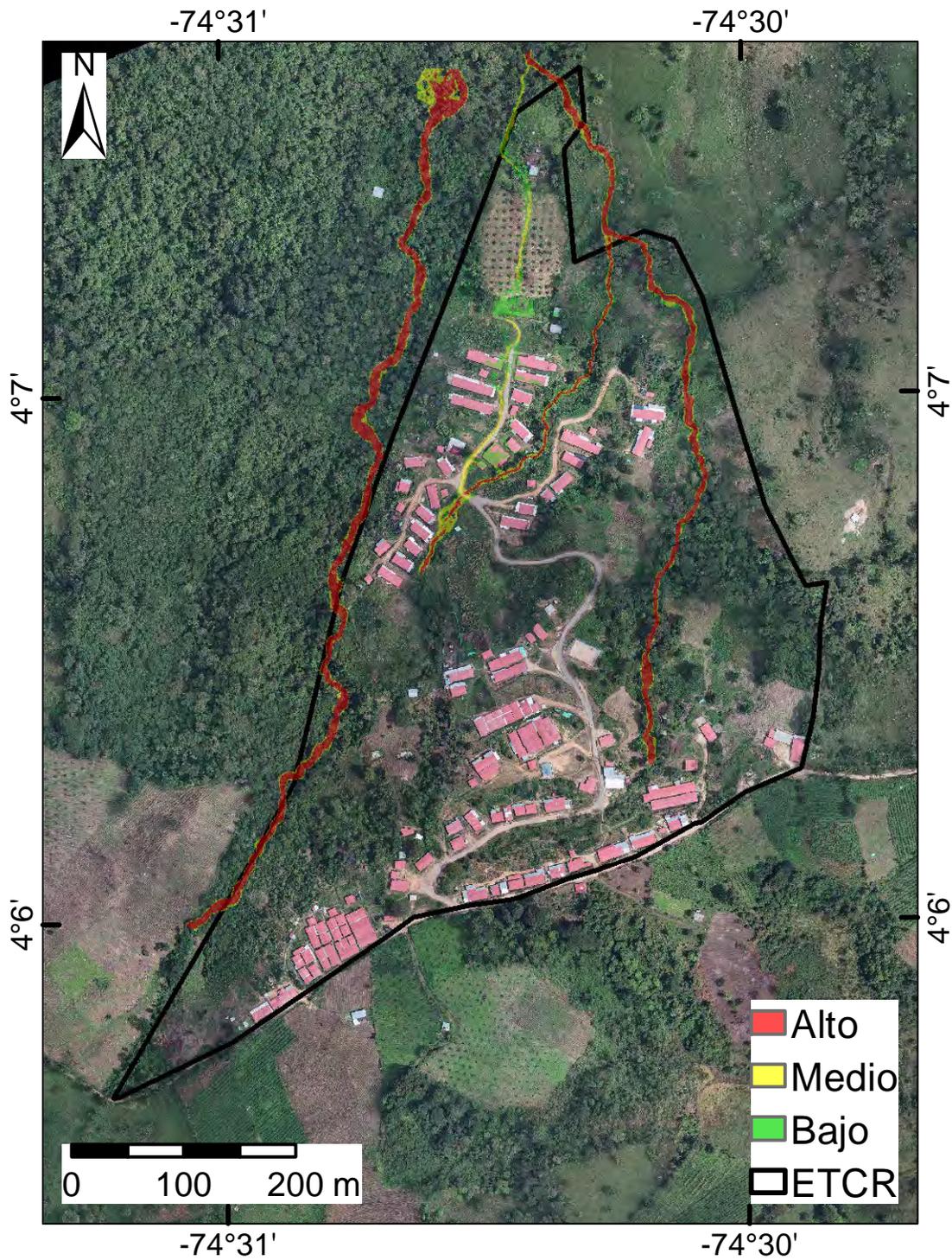


Figura 204: Nivel de amenaza por inundación

ETCR, por el costado noroccidental en las inmediaciones de la quebrada definida como NN1 para este propósito. Se tendrían también velocidades de hasta 7,6 m/s en las zonas de más alta pendiente de la quebrada NN1, demostrando

así su comportamiento torrencial.

Se observa que al interior del antiguo ETCR, la quebrada que por allí transcurre denominada como NN2, presenta un desbordamiento que transcurre a través de las vías internas del espacio territorial generando una bifurcación producto de la insuficiencia hidráulica de la obra de paso existente, sin embargo, el flujo que transcurriría a través de la vía no tendría mucho calado y por lo tanto carecería de poder destructivo.

#### **13.4. Amenaza final por inundaciones**

Posteriormente, se realiza un ajuste heurístico basado en la revisión de las geoformas fluviales cartografiadas y se corrige la potencial expansión de las inundaciones, con ello su potencial de amenaza. Este ajuste se presenta en la Figura 205. La mancha por amenaza de inundación ocupa el 4,6% del área total, y dentro del predio se desarrollan los tres niveles amenaza. Los cauces del lado izquierdo y derecho del predio desarrollan principalmente amenaza alta, mientras que el cauce localizado hacia el centro del antiguo ETCR presenta amenaza media y baja.

Además, se realiza la corrección recomendada en el Decreto 1807 del 2014, la cual consiste en una depuración correspondiente al área mínima cartografiable. Este ajuste adicional se presenta en la Figura 206 y constituye el resultado del mapa de amenaza final por inundaciones.

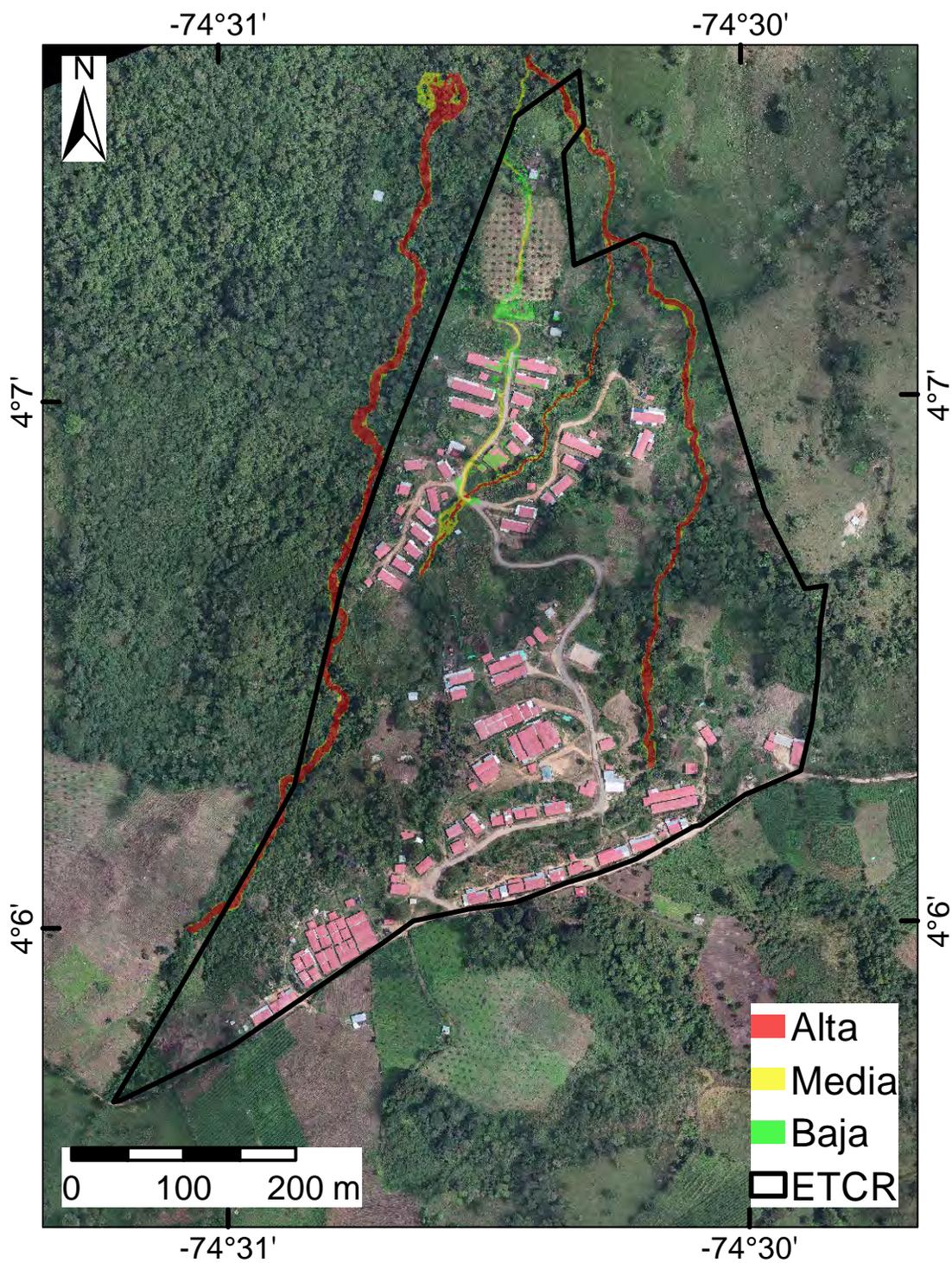


Figura 205: Zonificación de amenaza por inundaciones ajustada geomorfológicamente.

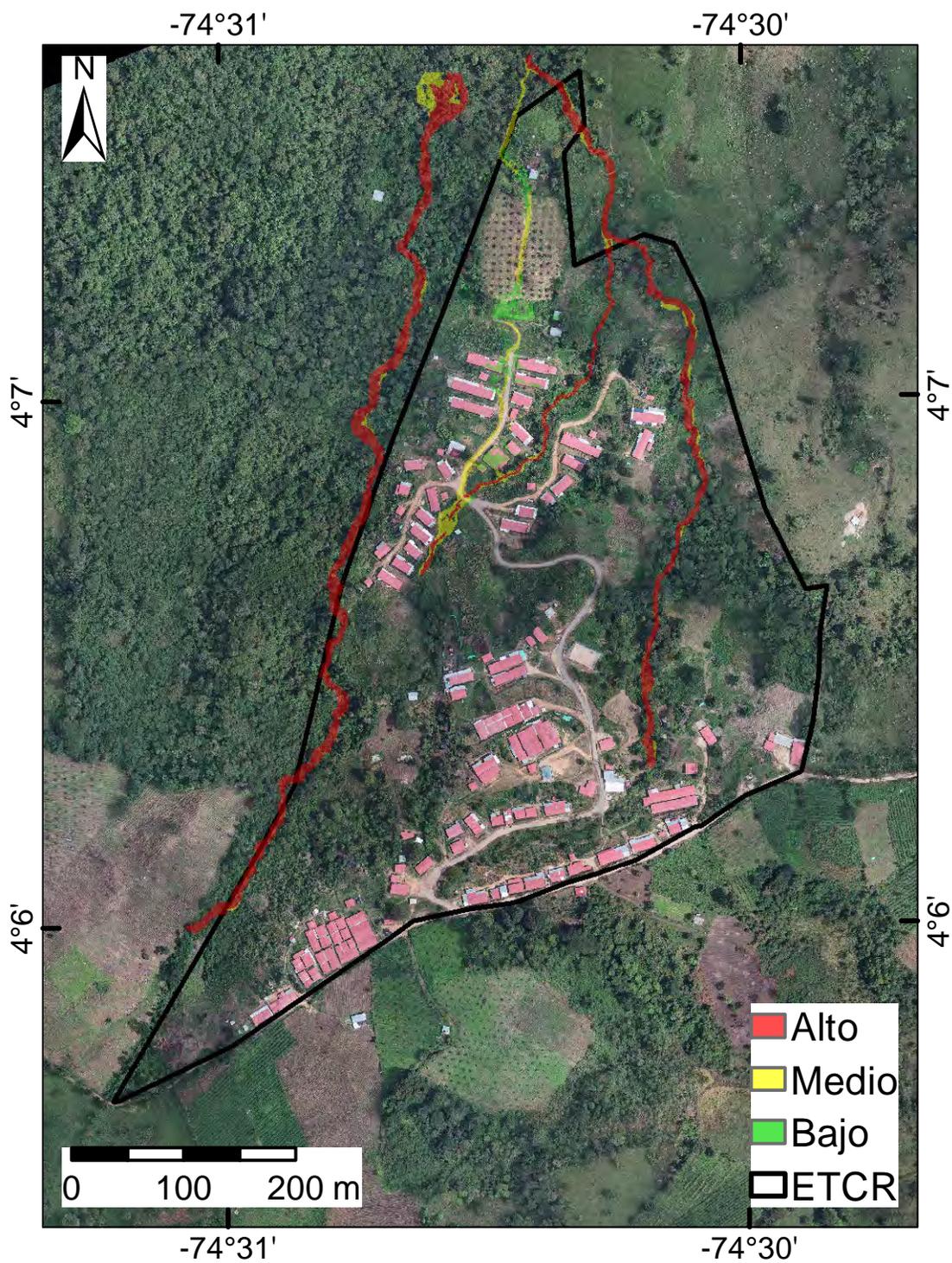


Figura 206: Zonificación final de amenaza por inundaciones.

# Referencias

- Arcement, G.J., Schneider, V. (1989). Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. *Water-Supply Paper 2339, US Geological Survey*.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., ... Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Metodos Numericos para Calculo y Diseno en Ingenieria*, 30(1), 1–10. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004> doi: 10.1016/j.rimni.2012.07.004
- Chow, V. T., Maidment, D. R., y Mays, L. W. (1994). *Hidrologia Aplicada*.
- FEMA. (2014). Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping Flood Depth and Analysis Grids.

## Capítulo 14

# Amenaza por Avenidas Torrenciales

### Introducción

En el análisis de zonificación de amenaza por avenidas torrenciales se realiza en los cauces que pueden llegar a transportar un volumen importante de sedimentos y roca, de tal manera que puedan representar un factor amenazante para la futura infraestructura y los habitantes del antiguo ETCR La Fila. Los afluentes analizados son NN1 y NN3 que drenan en sentido sur-norte el predio.

La evaluación de este fenómeno se llevó a cabo usando el modelo digital de elevación de 0,5 metros de resolución espacial que proporciona una escala en detalle de 1:1000 dando así cumplimiento a los requisitos para estudios en detalle establecidos por el Decreto 1807 de 2014 que da como escala de trabajo mínima 1:2000.

El análisis de estos complejos fenómenos se llevó a cabo con el modelo IBER que ha sido utilizado histórica y tradicionalmente en el país para la evaluación de amenaza para determinar alturas y velocidad de flujos. También se emplea el modelo *r.avafLOW* que es simula la reología ajustada y las interacciones multifásicas que se presentan en las avenidas torrenciales. Finalmente, el mapa de amenaza final surge de una comparación entre estas dos simulaciones en sus diferentes escenarios y un ajuste geomorfológico a partir de los depósitos cartografiados en la zona de estudio.

### 14.1. Metodologías

#### 14.1.1. Simulación hidrológica con IBER

Tradicionalmente la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales se lleva a cabo mediante la mayoración de caudales pico según un porcentaje de concentración máxima de sólidos suspendidos en la mezcla (usualmente

del 40 %) y realizando el tránsito hidráulico como un fluido newtoniano. La simulación del tránsito es realizada con ayuda del software IBER, uno de los modelos bidimensionales mayormente empleados y con licencia libre. El módulo hidrodinámico de IBER resuelve las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales, incorporando los efectos de la turbulencia y rozamiento superficial por viento a partir de un modelo numérico de volúmenes finitos. El modelo requiere los siguientes parámetros de entrada:

- Geometría: obtenida a partir del levantamiento topográfico escala 1:2000
- Rugosidad: A partir del uso del suelo visto en la ortofoto de alta resolución y las visitas de campo.
- Caudales: Obtenidos a partir de la hidrología llevada a cabo en los estudios básicos y transpuesta al punto de interés hidrológico.
- Concentración de sólidos: obtenida a partir de los eventuales volúmenes de sólidos que se moverán en el evento calculados en el capítulo de Amenaza por Movimientos en masa.

La distribución del caudal de ingreso a cada corriente a simular se realiza sosteniendo el caudal pico sumado a la concentración de sólidos máxima probable durante todo el tiempo de tránsito hasta estabilizar la simulación, es decir, hasta que el volumen de mezcla en el dominio espacial sea constante y se llegue a obtener flujo permanente.

Para este caso se realiza la simulación con el 80 % de concentración de sólidos buscando representar el escenario más crítico. La zonificación de amenaza en los diferentes niveles se lleva a cabo según se presenta en la Figura 201 (FEMA, 2014).

#### 14.1.2. Simulación fluido-dinámica con *r.avaflow*

*r.avaflow* es una herramienta computacional para la simulación de flujos, avalanchas y otros procesos concatenados que emplea (i) un modelo de dos a tres fases donde interactúan una mezcla de sólidos y fluidos (Pudasaini, 2012) o (ii) un modelo de única fase y fricción tipo Voellmy (Voellmy, 1955).

*r.avaflow* es adecuado para modelar complejas interacciones y cadenas de procesos al considerar el arrastre y depositación del material, es decir, el cambio de la topografía basal (Mergili, Fischer, Krenn, y Pudasaini, 2017). *r.avaflow* computa la propagación de masas previamente definidas en una o más áreas

fuentes sobre la topografía hasta que todo el material se ha depositado o abandona el área de estudio.

La funcionalidad central de *r.avaflow* consiste en la redistribución de la masa y el momento empleando un modelo de flujo dinámico y un esquema numérico a través de un sistema de seis ecuaciones diferenciales basadas en el modelo bifásico de Pudasaini (2012). Este modelo emplea la plasticidad de Mohr-Coulomb para el esfuerzo del sólido. El esfuerzo del fluido es modelado como un esfuerzo viscoso no newtoniano de un volumen sólido con gradiente de fracción mejorado. La transferencia de impulso interfacial generalizada incluye resistencia viscosa, flotabilidad y masa virtual inducida por la aceleración relativa entre las fases. Para una explicación más detallada del modelo consultar Mergili y cols. (2017).

Para la simulación de una avenida torrencial en la zona de estudio se evalúan dos drenajes que la pueden afectar: NN1 y NN3. Para estos dos drenajes se modeló el periodo de retorno de 500 años y fueron calculadas las hidrógrafas del flujo con concentraciones de sólidos de 80 %, 60 % y 40 % con caudales líquidos pico de  $3,3 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente. Las concentraciones de 80 % y 60 % ofrecen una perspectiva fenómeno que varía entre un movimiento en masa tipo flujo a un flujo hiperconcentrado de una fase y la concentración de 40 % da una mirada a los fenómenos torrenciales de dos fases como las inundaciones de escombros; el software *r.avaflow* permite modelar estas variaciones.

Este modelo es parametrizado de acuerdo con las condiciones específicas de cada escenarios de concentración de sólidos como se presenta en la Tabla 91: la densidad se presenta en  $\text{kg}/\text{cm}^3$ , la fricción hace referencia en su primer término a la fricción interna del flujo en grados y en el segundo a la fricción turbulenta en  $\text{s}^2/\text{m}$ , el término de arrastre es el logaritmo en base 10 del coeficiente de arrastre que es multiplicado por la energía cinética total del flujo y el coeficiente de depositación es el porcentaje de la energía cinética total del flujo por debajo de la cuál este se detiene al no tener energía suficiente para seguir avanzando.

Tabla 91: Parametrización del modelo

<b>Concentración de sólidos</b>	<b>Fases</b>	<b>Densidad</b>	<b>Fricción</b>	<b>Arrastre</b>	<b>Depositación</b>
80 %	Mezcla	2	35 y 3	-7	5 %
60 %	Mezcla	2	35 y 3	-7	5 %
40 %	Sólido y líquido	2, 7 y 1	35	-7	5 %

## 14.2. Resultados

### 14.2.1. Simulación hidrológica con IBER

Se presenta a continuación en la Figura 207 la zonificación de amenaza por avenida torrencial según el modelo hidráulico.

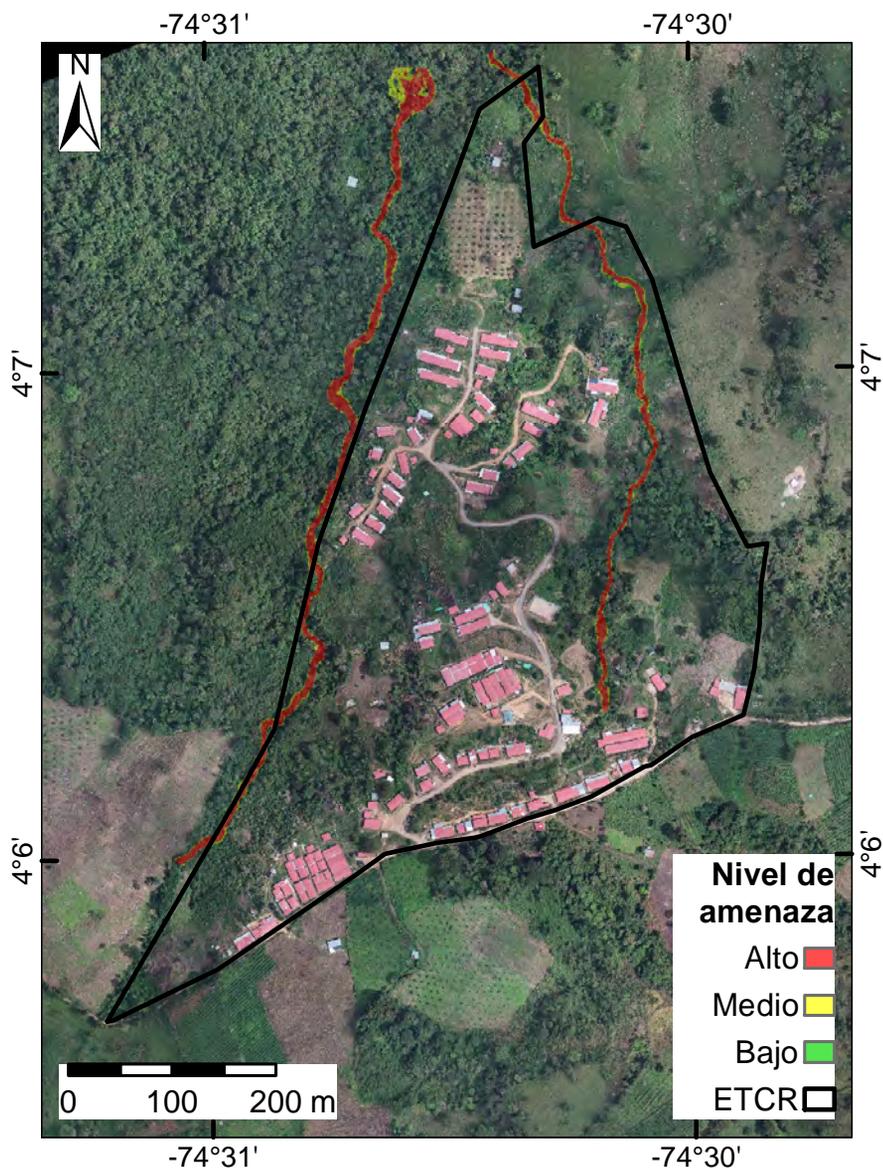


Figura 207: Zonificación de amenaza por avenida torrencial según el modelo hidrológico.

Se observa que se presenta un desbordamiento en el cruce vial del antiguo ETCR, desde la modelación hidrológica de la avenida torrencial no se evidencian

zonas de amenaza que afecten directamente la infraestructura existente.

#### 14.2.2. Simulación fluido-dinámica con *r.avaflow*

A continuación se presentan los resultados para los tres escenarios simulados y el mapa final de amenaza según el modelo fluido-dinámico. Los resultados se muestran en términos de altura con un umbral de visualización de  $0,3m$  que no se considera representativo para el fenómeno evaluado.

En la Figura 208 se muestra el primer y mayor escenario en términos de concentración de sólidos, 80 %, el modelo simula la más extensa cobertura del flujo con anchos medios en canal de 30 m alcanzando máximos de 130 m en el extremo norte donde los drenajes se acercan y los flujos de ambos se unen. Este escenario representa el de más potencial destructivo asumiendo que los drenajes tengan la energía suficiente para transportar la carga tan alta de sedimento impuesta y a su vez, representa el de menor probabilidad de ocurrencia.

Para el escenario de concentración de sólidos al 60 % visto en la Figura 209 el ancho medio del flujo es de 20 m en ambos drenajes y sus alturas no alcanzan para que inunden la zona norte. Solamente el drenaje NN1 se desborda localmente al norte del predio alcanzando anchos máximos de 50 m con alturas inferiores a 0,5 m.

El flujo bifásico presentado en la Figura 210, por el contrario, representa un escenario de menor poder destructivo que los flujos más concentrados pero de una probabilidad de ocurrencia mayor. Este flujo se limita en su totalidad a los drenajes con anchos medios de 10 m y máximos cercanos a 15 m.

A partir de la comparación de estos escenarios se construye el mapa de amenaza en niveles muy alto, alto y medio para la zona de estudio según el modelo fluido-dinámico presentado en la Figura 211.

#### 14.3. Amenaza final por avenidas torrenciales

Posteriormente, se realiza un ajuste heurístico basado en la revisión de las geoformas fluviales cartografiadas y se corrige la potencial expansión de estos flujos, con ello su potencial de amenaza. Además, se realiza la corrección recomendada en el Decreto 1807 del 2014, la cual consiste en una depuración correspondiente al área mínima cartografiable.

Estos ajustes se presentan en la Figura 212 como resultado del mapa de amenaza por avenidas torrenciales. Los ajustes se realizan sobre la envolvente de la clase de amenaza media obteniendo una mancha que ocupa el 6,6 % del

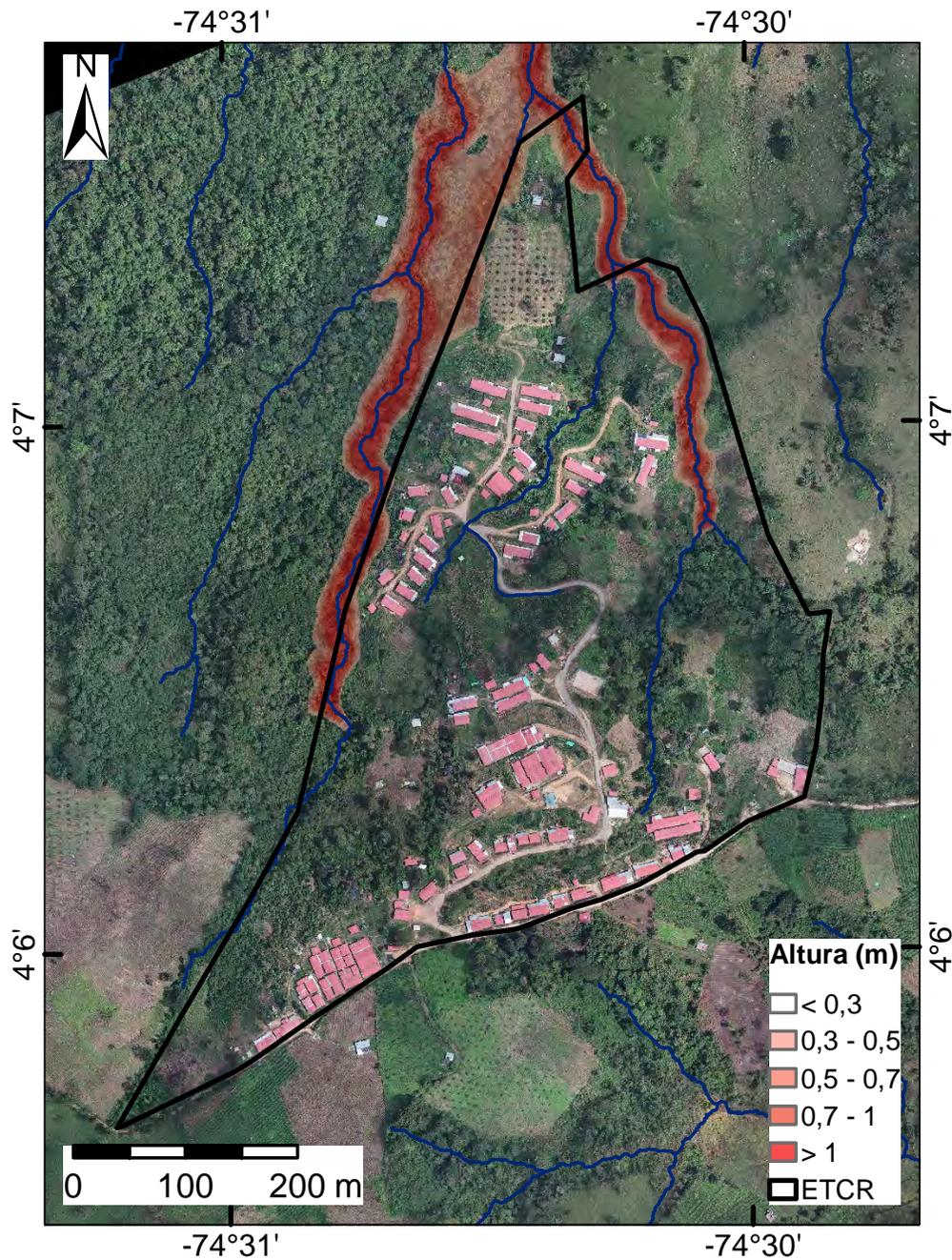


Figura 208: Simulación de la avenida torrencial de una fase con concentración de sólidos de 80 %.

área total. El afluente sobre el costado izquierdo representa una amenaza media y alta para el predio hacia la parte norte del mismo, mientras que hacia el sur se observan áreas puntuales del predio con amenaza muy alta. El afluente sobre el costado derecho desarrolla los tres niveles de amenaza dentro del antiguo ETCR La Fila.

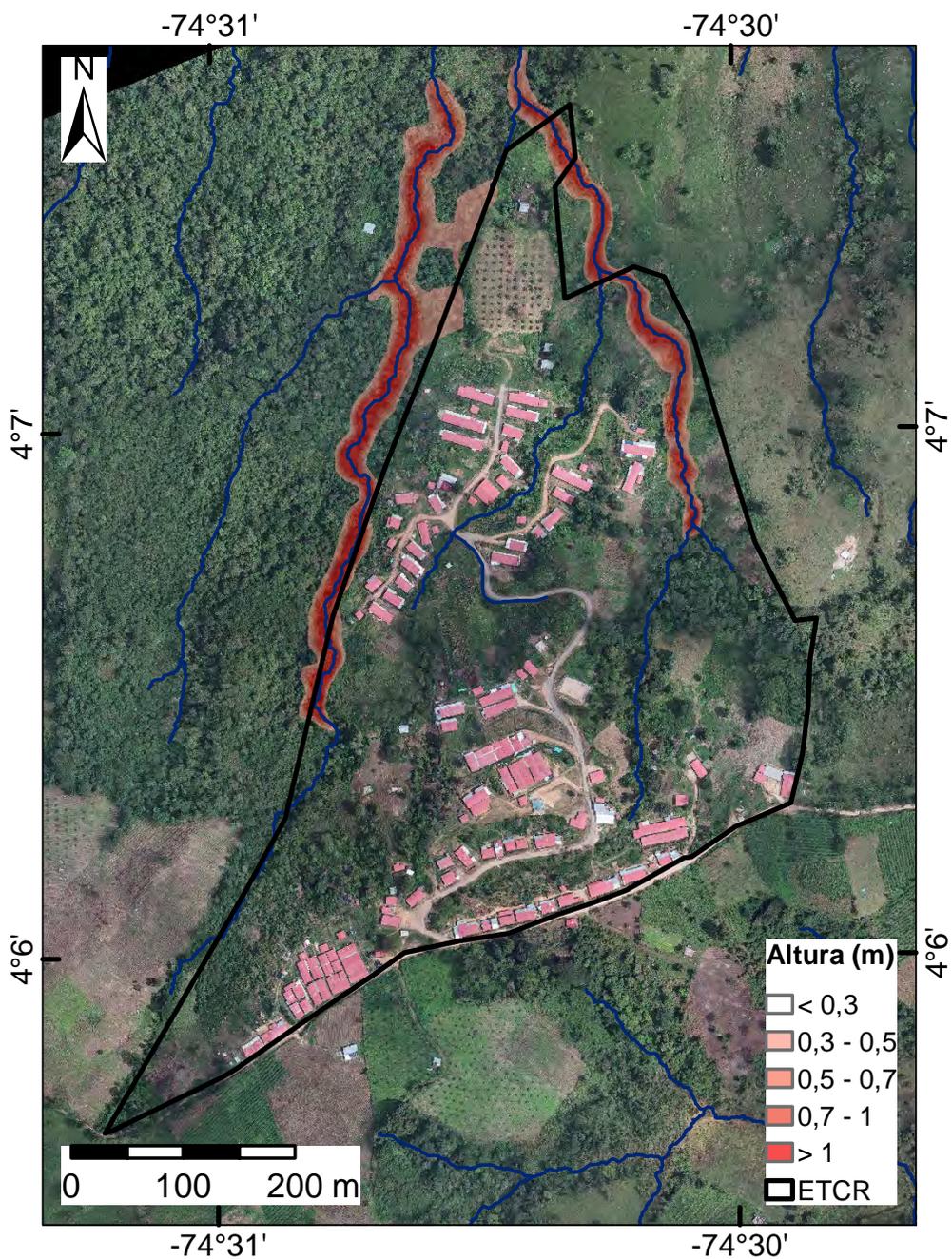


Figura 209: Simulación de la avenida torrencial de una fase con concentración de sólidos de 60 %.

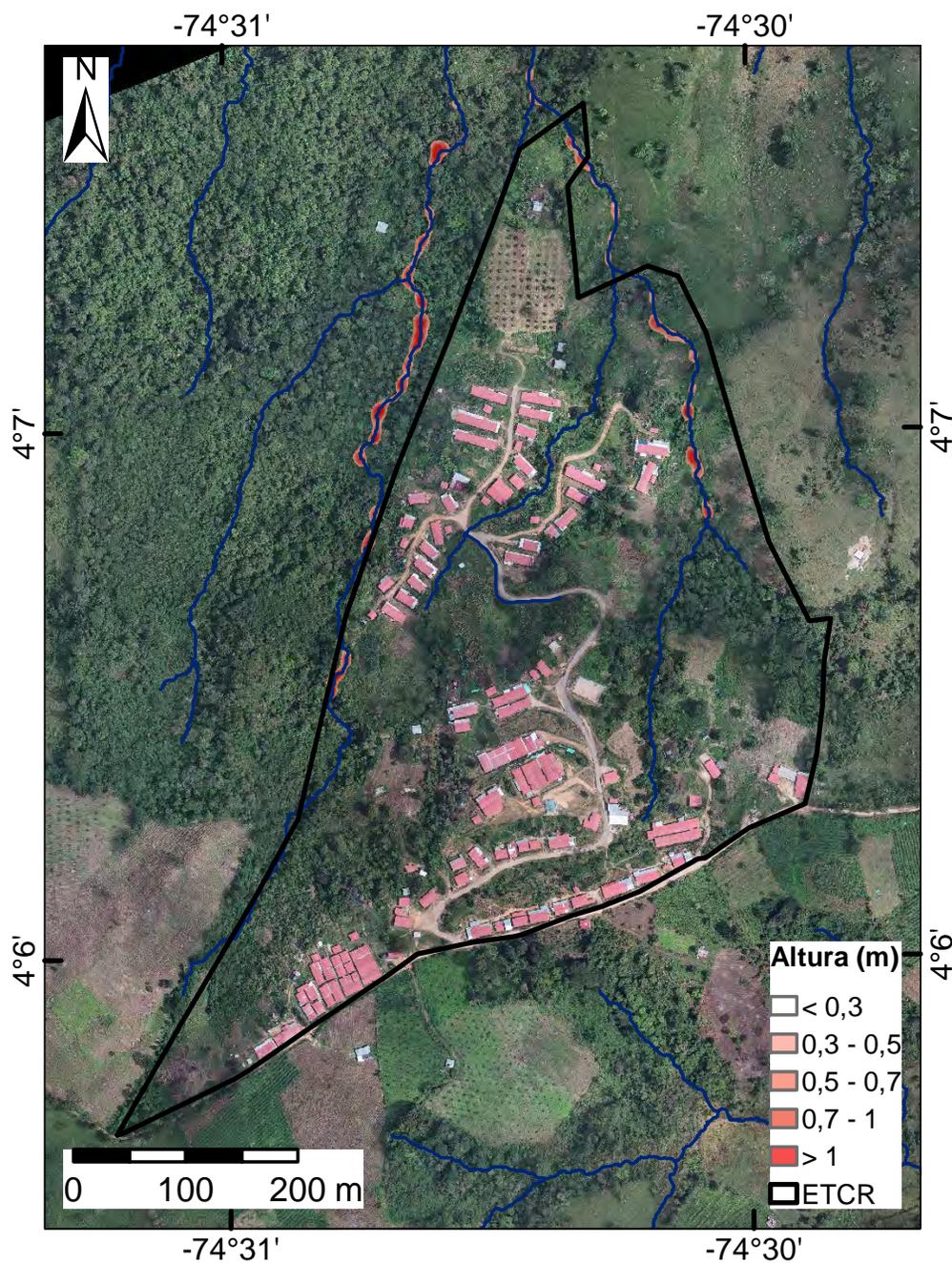


Figura 210: Simulación de la avenida torrencial de dos fases con concentración de sólidos de 40 %.

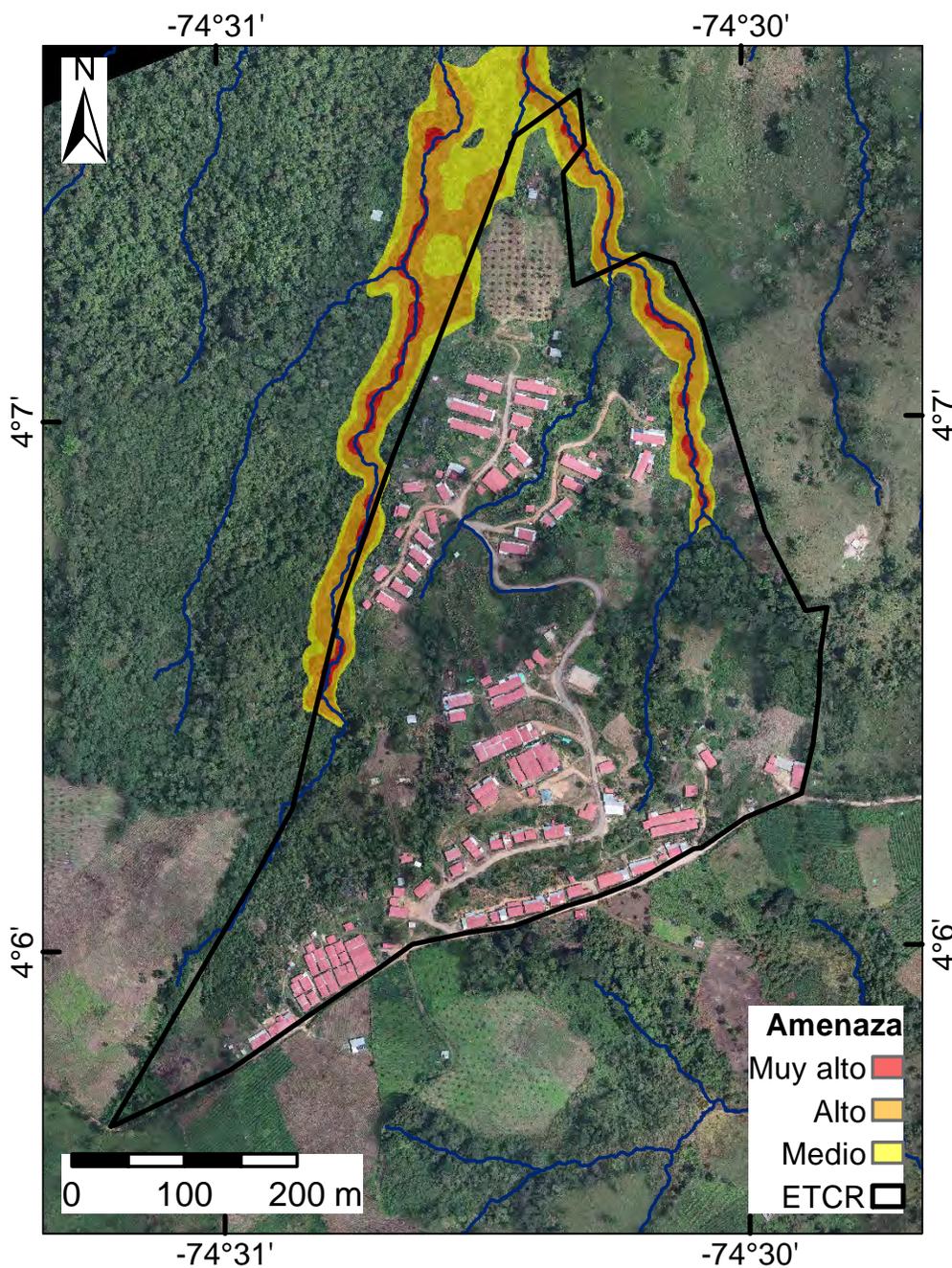


Figura 211: Zonificación de amenaza por avenidas torrenciales.

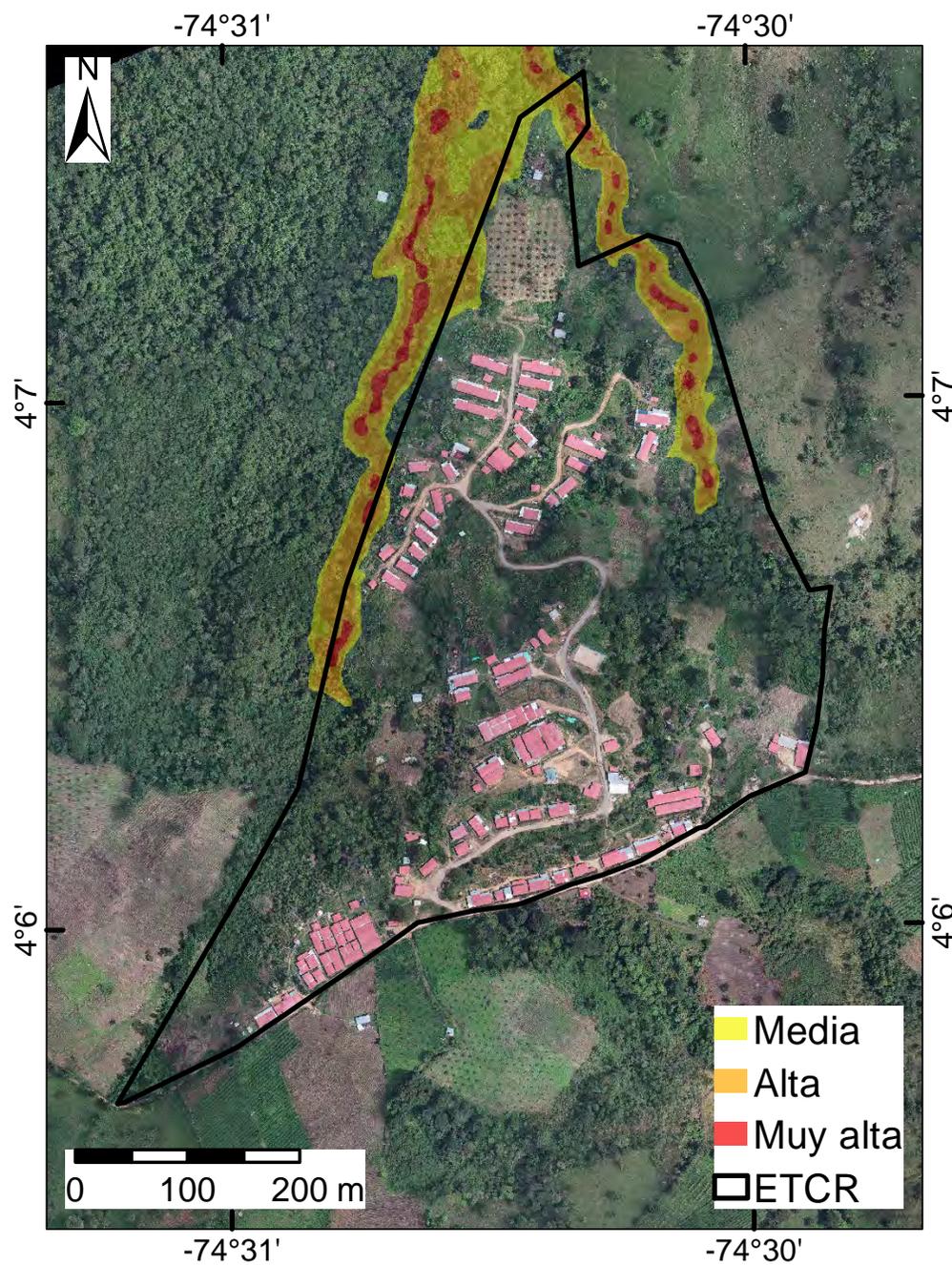


Figura 212: Zonificación final de amenaza por avenidas torrenciales.

# Referencias

- FEMA. (2014). Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping Flood Depth and Analysis Grids.
- Mergili, M., Fischer, J.-T., Krenn, J., y Pudasaini, S. P. (2017). r. avafLOW v1, an advanced open-source computational framework for the propagation and interaction of two-phase mass flows. *Geoscientific Model Development*, 10(2), 553–569.
- Pudasaini, S. P. (2012). A general two-phase debris flow model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F3).
- Voellmy, A. (1955). Über die zerstörungskraft von lawinen. *Schweizerische Bauzeitung, Jahrg.*, 73, 159–162.

## Capítulo 15

# 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, avenidas torrenciales e inundaciones en el antiguo ETCR La Fila.

### 15.1. 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, 2015). 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 antiguo 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 92 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. La muestra está delimitada a la presencia de los miembros de la familia en las viviendas, dada el alto nivel 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 la Fila, se realizaron 50 encuestas con las que

se caracterizaron, en parte de la misma a 132 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 134 o 50.

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:

### 15.1.1. Fragilidades socioeconómicas



Figura 213: Fragilidad social y económica antiguo ETCR

De acuerdo con los resultados del procesamiento de información, el antiguo ETCR posee una fragilidad socioeconómica media, como se puede observar en la Figura 214, jalonada por las variables económicas.

La variable proyectos productivos activos, se califica en esa medida por las dinámicas económicas observadas y registradas en el trabajo de campo, en el proyecto de ganadería, por ejemplo y el de servicios (Hospedaje, tienda y alimentación) los cuales funcionan con regularidad, además del proyecto de la

Tabla 92: 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 activosm	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
	Confianza en actores locales	Personas que confían cuando tienen una dificultad en las organizaciones del antiguo ETCR
Capacidad de gestión y cooperación	Participación 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	Personas que conocen organizaciones locales para la GRD
		Personas que participan en organizaciones para la GRD
	Alianzas y cooperación	Alianzas establecidas por antiguo ETCR
Capacidad de apropiación	Permanencia y expectativas de crecimiento del 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 93: Escala de valoración

CATEGORÍA	CALIFICACIÓN CUALITATIVA
Escolaridad	Alto
Cobertura en salud	Bajo
Enfoque diferencial social	Medio
Ingresos adicionales	Medio
Enfoque diferencial económico	Medio
Proyectos productivos (antiguo ETCR)	Medio

cervecería “La Roja”, el cual viene teniendo un auge importante. Sin embargo, la dimensión económica es altamente frágil, a cuatro años de la firma de los acuerdos, la mayoría de los proyectos están aún en etapas muy incipientes, a lo que se le suma que los proyectos más fortalecidos poseen desde la norma limitantes para asentarse en el suelo rural, o las tierras disponibles para el trabajo son escasas en el antiguo ETCR, lo que implica la movilización de los habitantes y sus familias, a otros lugares fuera y dentro del municipio para llevarlos a cabo.

Por su parte, el enfoque diferencial económico que da cuenta de la situación de la mujer frente a la recepción de ingresos adicionales diferentes a la renta básica, se califica también en una escala intermedia, pues el 16 % de las jefaturas de hogar están en manos de las mujeres sin ingresos adicionales.

Los ingresos adicionales a la renta básica, se ubica en la misma escala, en este contexto muchos de las personas, principalmente hombres trabajan como escoltas de sus antiguos compañeros, dirigentes hoy en los antiguo ETCR o representantes ante instancias nacionales, actividad que hace parte de los programas estatales de reincorporación, mejorando de manera significativa, con relación a los que realizan otras actividades, su acceso a recursos económicos. El 86 % de las familias cuentan con ingresos adicionales a la renta básica.

El nivel de escolaridad, aunque en esta clasificación constituye una categoría social, también se puede analizar como económica dado que da cuenta de la cualificación del recurso humano para el trabajo, y en este sentido, es determinante para la remuneración. Frente a la muestra el 29,8 % de las personas de 17 años en adelante cuentan con la secundaria completa, el 20,8 % de la población en estas mismas edades cuentan con la secundaria incompleta, en este sentido el 50 % de la población en estas edades no ingresaron al sistema escolar, o están y/o terminaron los grados de la básica primaria. Este indicador es fundamental para definir las capacidades de una persona y/o colectivo para conocer, prevenir

y mitigar los riesgos y expresa los niveles de desigualdad en el acceso al sistema educativo y las falencias en el proceso de reincorporación.

Por su parte, de las categorías asociadas a la fragilidad social, la mejor posicionada, es la cobertura en salud, por el acceso universal al sistema de salud de los excombatientes, sea a través del régimen subsidiado o contributivo. El 100 % de los encuestados y sus familias, están afiliados a una EPS.

La variable enfoque diferencia social, se sitúa en una escala media, es decir la proporción entre hombres y mujeres con jefatura única de hogar es similar, lo que constituye una particularidad frente a la dinámica cultural del país. Aun así, la inequidad prevalece al contar con que el número de mujeres con jefatura de hogar sin ingresos adicionales, dobla el número de hombres en dicha condición, haciendo referencia a una brecha importante entre mujeres y hombres en el acceso a recursos económicos e incluso al mercado laboral.

Dentro del enfoque diferencial relacionado con la fragilidad social se tuvo en cuenta, la población en condición de discapacidad, la cual, aunque es alta, de un 4,4 %, superando en 4 puntos porcentuales el dato del país y por cuatro puntos el departamento, se ubica en una escala media. El tipo de discapacidad prevalente es la motora, sin embargo, la mayoría de casos no compromete la movilidad por sus propios medios de las personas que viven con dicha condición.

Los bajos niveles de escolaridad e ingresos y las desigualdades económicas entre hombres y mujeres, inciden en el mediano y largo plazo en la sensibilidad y los niveles de concientización frente a la emergencia y el desastre, elevan el sentimiento de incapacidad de manejo del riesgo, y por tanto en un estado de relajamiento ante el mismo. Las dos últimas, categorías además tienen correlación directa con las posibilidades de preparación, respuesta y recuperación ante la materialización del riesgo.

### **15.1.2. Capacidades sociales**

El procesamiento de los datos y la aplicación de la metodología arroja que las capacidades sociales de la población del antiguo ETCR, se posicionan en un nivel medio, con un rango de actuación importante en las variables que dan cuenta de la organización social y en las expectativas sobre la permanencia, y uno muy reducido frente al conocimiento del riesgo y la articulación con las instituciones locales, tal y como lo expresa la Figura 214.

Las capacidades sociales se relacionan con la organización, gestión y cooperación y la apropiación. La mayoría de las categorías asociadas, muestran un



Figura 214: Capacidades antiguo ETCR

comportamiento similar, tendiente al equilibrio y a la resiliencia.

Las categorías organización para la participación y confianza en actores locales, catalogadas como capacidades de organización en la escala cualitativa son altas, sólo el 8 % de los encuestados expresan no pertenecer a ninguna organización, hay un poco más de 5 formas de organización (comités, proyectos productivos, asociaciones) que además de lo económico promueven actividades de formación e integración alrededor de la salud, la cultura y la educación y confían en organizaciones del antiguo ETCR, el 80 % de los encuestados. Además, se evidencia una organización interna por comunas o sectores, que permiten tramitar necesidades, dificultades e inquietudes, con una importante apropiación y confianza, desde los pobladores, en los procesos que genera y en los actores que la lideran.

Por su parte las capacidades relativas a la gestión y la cooperación tienen dos categorías con una baja calificación frente a las otras. La participación de líderes de los antiguo ETCR, se da con más facilidad, en los espacios de discusión, reflexión y decisión en las mesas e instancias de representación de esta población a nivel nacional que a nivel municipal, lo que es comprensible por el proceso que enmarca su situación actual, sin embargo, a nivel de otras dimensiones de la dinámica territorial e incluso como parte de la reincorporación, la vinculación con instancias locales y municipales es escasa, restringida en muchos casos por las percepciones negativas hacia la población en dicho proceso. Con respecto a la gestión del riesgo esta situación amplifica de manera importante la vulnera-

Tabla 94: Escala de valoración

<b>CAPACIDADES SOCIALES</b>		
<b>CATEGORÍA</b>	<b>CALIFICACIÓN CUALITATIVA</b>	<b>CALIFICACIÓN CUANTITATIVA</b>
Organización para la participación	Alta	1
Confianza en actores locales	Alta	1
Participación antiguo ETCR a nivel local	Baja	0.1
Conocimiento y participación en la GRD	Baja	0.1
Alianzas y cooperación	Media	0.5
Permanencia y expectativas de crecimiento del antiguo ETCR	Alta	1

bilidad de la población del antiguo ETCR, incidiendo de manera directa en la preparación y capacidad de respuesta de este, e impidiendo se puedan elevar sus capacidades de conocimiento y reducción del riesgo desde la gestión conjunta del territorio.

A esta particularidad se le suma entonces, el que la categoría conocimiento y participación en la gestión del riesgo, es la que tiene la más baja representatividad frente a las de su mismo factor y a las del factor fragilidad. De 50 encuestas aplicadas en el antiguo ETCR, sólo una persona expresa conocer entidades que gestionan el riesgo a nivel municipal y local, esa misma manifiesta a ver recibido capacitaciones en ese sentido y ninguna obviamente participa en alguna organización de GRD. No tienen una herramienta de planificación relacionada con alguno de los procesos para la gestión del riesgo, lo que sumado los hace a nivel personal y colectivo altamente vulnerables. Estos análisis reflejan además los niveles de alcance institucional y social del asunto, la capacidad o no de generar “acciones sistemáticas, coherentes y con cohesión social, de preparación ante la probable ocurrencia de eventos amenazantes” (Bohórquez, 2013).

A través de otras preguntas se puede también identificar que, aunque conscientes de los eventos socio-naturales, no está presente en el lenguaje, la probabilidad de ocurrencia de un evento extremo. Estos aspectos pueden incidir fuertemente, de acuerdo a las dinámicas que se den de cumplimiento de los acuerdos o no y de la satisfacción de las personas en reincorporación, en las

decisiones que tomen de localización y en las formas de apropiación, habitación y explotación de la naturaleza (Bohórquez, 2013).

Dentro del factor capacidades para la gestión y la cooperación, se encuentra también la categoría Alianzas y cooperación, la cual a diferencia de las anteriores pertenecientes a este factor, tiene una mejor representatividad, dado que algunos acondicionamientos que disfrutaban en el antiguo ETCR e impulsos a proyectos se debe a este tipo de vinculación, que no siempre esta mediada por el gobierno nacional. Tanto agencias de cooperación extranjeras como nacionales, han contribuido con conocimiento, gestión de proyectos, recursos, entre otras capacidades instaladas; para esto se ha requerido la voluntad de la articulación y la capacidad de gestionar, a partir de los aprendizajes obtenidos, el desarrollo de su territorio.

La categoría permanencia y expectativas de crecimiento del antiguo ETCR, perteneciente al factor capacidades de apropiación, propone para su calificación las variables: personas que se proyectan viviendo en el antiguo ETCR y personas que creen que sus familias vivirán con ellos en el antiguo ETCR, presentando porcentajes del 96 % y 70 % respectivamente, los resultados son importantes porque permiten deducir que los niveles de expectativa que tiene la población frente a su asentamiento permanente son altos, con relación a la información etnográfica podría dar cuenta de la construcción de identidad territorial, pensada desde el imaginario y las proyecciones que tiene del espacio que habitan hoy de manera provisional y aquel que esperan que sea en el futuro, su intención de quedarse allí y de construir familia en ese mismo territorio.

Frente al riesgo de desastres, esta capacidad incide, si es orientada de la manera adecuada y en el tiempo adecuado, en la forma en la que habitaran la zona, el sentido que quieren tendrá el asentamiento, elevando los niveles de cohesión social y por tanto, procesos de seguimiento e incidencia en su consolidación.

## 15.2. Vulnerabilidad física

En el presente capítulo se determina la vulnerabilidad de las estructuras ubicadas en el antiguo ETCR La Fila 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 y 14. 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 las metodologías y resultados correspondientes a la vulnerabilidad física para movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales.

### 15.2.1. 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, 2015). 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:

$$V = \begin{cases} \frac{1}{2} \left( \frac{I}{1-S} \right)^2 & \text{si } I \leq 1 - S \\ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{1-I}{S} \right)^2 & \text{si } I > 1 - S \end{cases} \quad (15.1)$$

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.

### 15.2.1.1. 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, 2015).

Para el cálculo de la fragilidad de edificaciones ( $S_e$ ) se siguió la metodología establecida por el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2015), 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 15.2 (SGC, 2015).

$$S_e = 1 - (1 - S_{tip})(1 - S_{alt})(1 - S_{con})(1 - S_{ed}) \tag{15.2}$$

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 95).

Tabla 95: 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 96).

Tabla 96: 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 97).

Tabla 97: 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 98).

El cálculo del valor de vida útil se puede determinar en función del tipo de edificación (ver Tabla 99).

El actual asentamiento del antiguo ETCR La Fila en Icononzo, Tolima, presenta una extensión de 22 hectáreas y contempla 89 módulos de alojamiento.

Tabla 98: Factor de fragilidad por edad de la edificación

RELACIÓN 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

Tabla 99: 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

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) con captación de fuente hídrica superficial, 6 Pozos sépticos, conexión eléctrica, recolección de residuos sólidos y suministro de gas (ARN, 2020)

Actualmente los módulos de vivienda Figura 215, 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).

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 100 se presentan los valores empleados para las tipologías comunes identificadas y sus correspondientes fac-

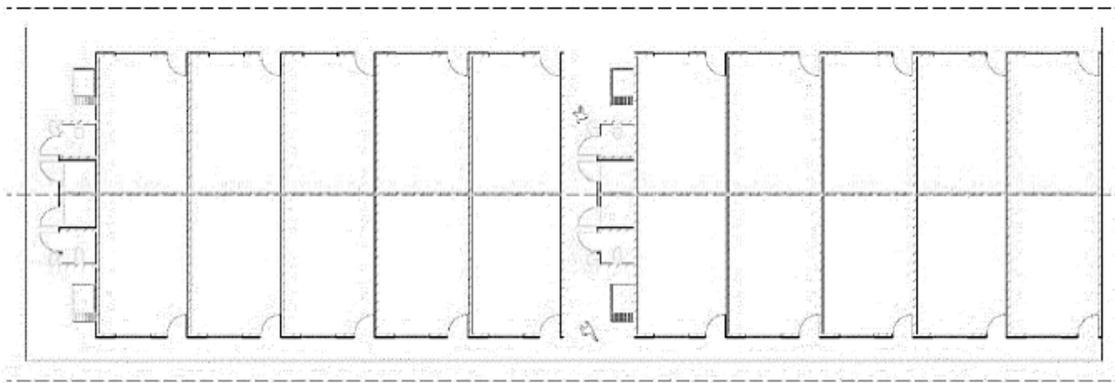


Figura 215: Planos módulos actuales de vivienda "Galpones" (Barreto, 2019).

Tabla 100: Factores de fragilidad de las estructuras.

Construcción	$S_{tip}$	$S_{alt}$	$S_{con}$	$S_{ed}$	Fragilidad ( $S_e$ )
Estructura de alojamiento	0,90	0,90	0,25	0,10	0,993
Escuela	0,90	0,90	0,25	0,10	0,993
Biblioteca	0,70	0,60	0,25	0,10	0,919
Guardería	0,70	0,60	0,05	0,10	0,897

tores. Con respecto al factor  $S_{tip}$  se considera que las viviendas en su mayoría están constituidas de acero, fibrocemento, aluminio y drywall, por lo tanto se adopta la clasificación de estructuras ligeras para estas; la biblioteca y guardería son estructuras con confinamiento deficiente, además la escuela y módulos son estructuras ligeras (ver Figura 216).

Para el estado de conservación de las estructuras ( $S_{con}$ ), se estableció un estado de mantenimiento en general con deformaciones leves, exceptuando la PTAP y CDI con una conservación media. 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 100), se observa que el mayor valor de fragilidad está asociado a la Estructura de alojamiento, con un valor de 0,993 que a su vez es igual al resultado final de fragilidad para la escuela. La Biblioteca y la Guardería presentan valores de 0,919 y 0,897, respectivamente. Siendo la guardería la de menor valor de fragilidad. En general, los valores de



Figura 216: Estructuras encontradas en el antiguo ETCR. (a) Módulos de vivienda, (b) Escuela, (c) Biblioteca, (d) Guardería

fragilidad se presentan en rangos cercanos a 1 lo que implica según la ecuación 15.2 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.

### 15.2.1.2. Intensidad

La magnitud del evento se considera a partir de la intensidad descrita en la Ecuación 15.1, 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 15.3 (SGC, 2015).

$$I_{rap} = 1 - (1 - I_{f-pre}) * (1 - I_{f-prof}) \tag{15.3}$$

Donde:

$I_{rap}$  = Intensidad para deslizamientos rápidos

$I_{f-pre}$  = Parámetro de intensidad por presión del impacto

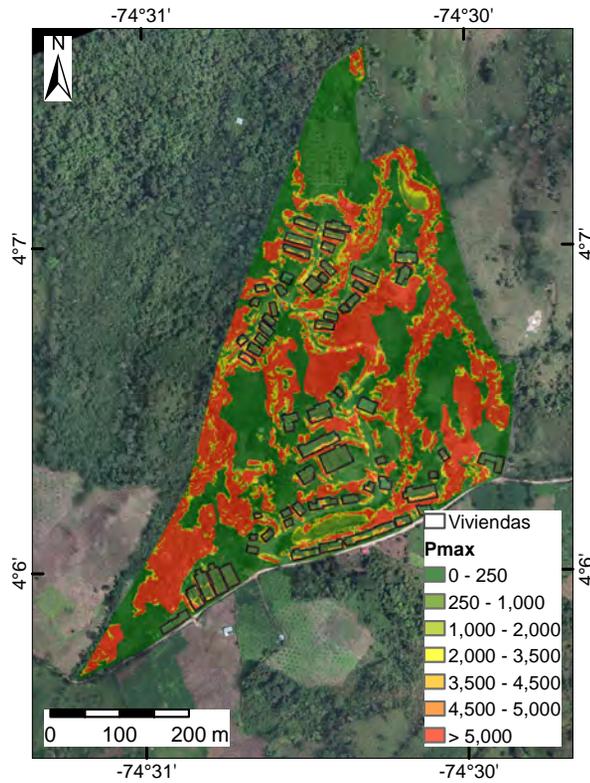
$I_{f-prof}$  = Parámetro de intensidad por profundidad del deslizamiento

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.

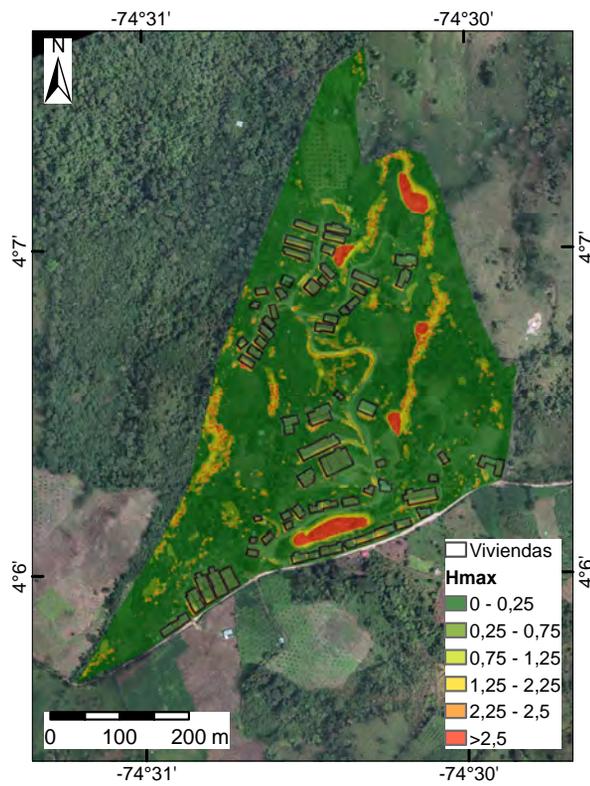
La magnitud de los probables eventos de movimientos en masa son asignados a cada elemento existente en el antiguo ETCR de La Fila de la siguiente forma; en las Figuras 217, se presentan los diferentes valores de presión y profundidad producto de la propagación de los movimientos en masa. Como se puede 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 101). Obtenida la relación entre las variables mencionadas, se puede implementar la Tabla 102, la cual permite transformar cada tasa en el parámetro de intensidad por presión (SGC, 2015).

Por otro lado, el parámetro de intensidad asociado a la profundidad del deslizamiento ( $I_{f-prof}$ ) se estima a partir de la relación entre la profundidad del 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 103, la cual asigna a cada relación el parámetro de intensidad asociado a la profundidad del movimiento en masa



(a) Presión del impacto ( $P_{max}$ )



(b) Profundidad del depósito ( $H_{max}$ )

Figura 217: Mapas de propagación por movimientos en masa en el antiguo ETCR de La Fila.

Tabla 101: Presión límite o de falla, según tipo de estructuras. Fuente:(SGC, 2015)

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 102: Parámetro de intensidad por presión del impacto ( $I_{f-pre}$ ). Fuente:(SGC, 2015)

$P_{max} / P_{lim}$	$I_{f-pre}$
<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

(SGC, 2015). Finalmente, se determina la intensidad mediante la Ecuación 15.3 que junto con la fragilidad de cada elemento se determina la vulnerabilidad física.

Tabla 103: Parámetro de intensidad según la profundidad del deslizamiento y la altura de las edificaciones. Fuente:SGC (2015)

$H_{max} /$ 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

### 15.2.1.3. Mapa de vulnerabilidad por movimientos en masa

En la Figura 218 se presenta el mapa de vulnerabilidad física de los elementos existentes en el asentamiento sujetos a la amenaza por movimientos en masa. Las categorías empleadas en el mapa de vulnerabilidad 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, 2015).

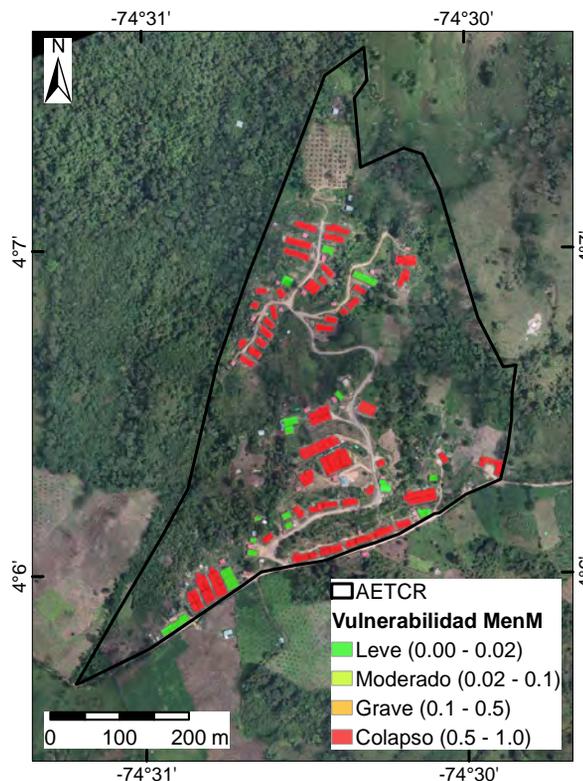


Figura 218: Vulnerabilidad por movimientos en masa en el antiguo ETCR de La Fila

### 15.2.2. Vulnerabilidad por Inundaciones

Las inundaciones fluviales son un componente natural del ciclo hidrológico con una variedad de consecuencias que incluyen daños económicos, sociales, ecológicos y ambientales (Pistrika, 2010). Como efecto del cambio climático, es probable que las inundaciones en muchas partes del mundo aumenten en intensidad y frecuencia en el futuro (Yamazaki D, 2018).

A partir del modelo hidrodinámico bidimensional empleado en el capítulo 13 se obtiene la mancha de calado, que más precisamente indica la profundidad de la inundación y su extensión, esta es la magnitud considerada en la amenaza por inundación y los posibles daños ocasionados a los elementos (estructuras) presentes en el área de estudio. La metodología implementada para la cuantificación del daño ocasionado por la inundación se considera el modelo propuesto por J y cols. (2020):

$$EAD = 0,5 \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{i+1}} \right) (D_i + D_{i+1}) \tag{15.4}$$

Donde:

$T$  = Período de retorno.

$D$  = Daño económico

La Ecuación 15.4 expresa en qué medida un área se ve afectada por inundaciones utilizando el modelo de pérdidas por inundación para estimar los daños anuales esperados (EAD) agregando los daños estimados para diferentes períodos de retorno de inundaciones. La estimación de los daños económicos considera una serie de insumos, tales como: (1) mapa de profundidad de inundación, (2) mapa de elementos expuestos, y (3) curvas de daño. A continuación se describen las características de los insumos y la cuantificación del daño económico mediante las curvas de daño propuestas por J y cols. (2020).

### 15.2.2.1. Curvas de daño

Las curvas de daño estiman el porcentaje de daño a partir de la profundidad de la inundación. En la Figura 219 se presentan las curvas de daño según los materiales empleados en los elementos expuestos. Estas curvas son definidas en la metodología de J y cols. (2020) que se realizó por medio de una compilación exhaustiva de funciones de daño relativo representadas en la Tabla 104. Esta información se extrajo de informes de proyectos y consultoría internacionales, y de análisis empírico artículos de varios países con diferentes condiciones y categorías similares de uso de la tierra. Las funciones se derivaron mediante análisis de regresión y una posterior adaptación técnica (J, L, y D, 2017).

Tabla 104: Funciones de daño según categorías de construcción y valores para los materiales de las estructuras. Donde  $h$ =profundidad de inundación y  $mf$ =factor de material.

Categoría	Función de daño (%)	Tipos de material	mf
Residencial	$\text{Daño} = (-2,41h^2 + 23,34h + 2,12) * mf$	Estructura de mampostería	1
Comercial	$\text{Daño} = (-1,38h^2 + 21,92h + 1,94) * mf$	Madera	1,77
Industrial	$\text{Daño} = (-0,48h^2 + 15,11h + 4,03) * mf$	Acero/Metal	0,88
Religión	$\text{Daño} = (-0,11h^2 + 13,98h + 8,17) * mf$	Concreto	0,96
Gubernamental	$\text{Daño} = (-0,33h^2 + 14,78h + 8,32) * mf$	Estructura material mixto	2,5
Instalaciones esenciales	$\text{Daño} = (-0,11h^2 + 13,98h + 8,17) * mf$		
Otros	$\text{Daño} = (-0,13h^2 + 15,75h + 9,21) * mf$		

La Figura 219 representa el porcentaje de daño en diferentes tipos de materiales de la Tabla 105 para una determinada profundidad de la inundación, los tipos de materiales definen la variabilidad de cada curva debido a la fragilidad de los materiales, otro aspecto importante de la variabilidad de las curvas es que a mayor profundidad de la inundación mayor será el porcentaje de daños.

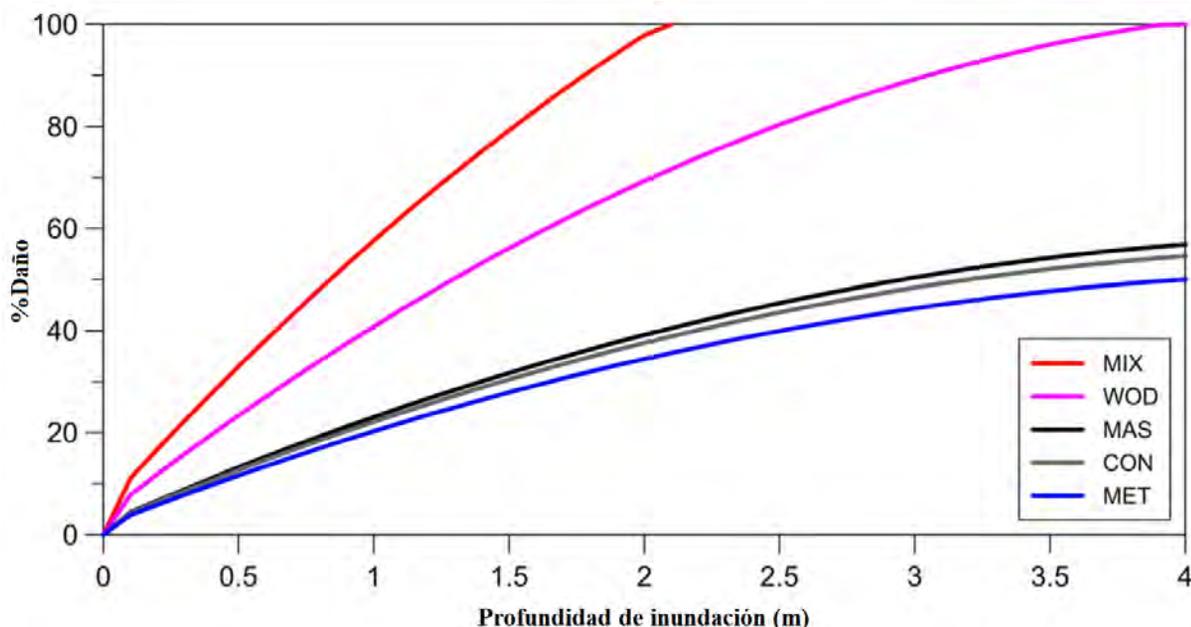


Figura 219: Funciones de daño según la profundidad de inundación en construcciones residenciales bajo diferentes materiales (material mixto, MIX; madera, WOD; mampostería, MAS; concreto, CON; acero/metal, MET). Adaptado de J y cols. (2020).

El tipo de material descrito para los elementos varía entre concreto, metal, madera, etc; y da una categoría para clasificar a que tipo de construcción corresponde los elementos como por ejemplo residencial, industrial, comercial, etc. Luego en los sitios vulnerables por la mancha de inundaciones se selecciona una ecuación extraída de la metodología que involucra la profundidad de la inundación en cada casa, su tipo de material y su categoría, que finalmente esta ecuación nos arroja un valor del daño ocasionado para cada vivienda o cualquier otro elemento significativo a analizar.

Tabla 105: Categoría y tipos de material para diferentes elementos de construcción

Categoría de construcción	ID	Tipos de material	ID
Residencial	RES	Estructura de mampostería	MAS
Comercial	COM	Madera	WOD
Industrial	IND	Acero/Metal	MET
Religión	REL	Concreto	CON
Gubernamental	GOV	Estructura material mixto	MIX
Instalaciones esenciales	ESF		
Otros	OTR		

Para los actuales espacios de vivienda se consideraron estructuras construidas con materiales de estructura mixta (MIX), esto a partir del inventario de

estructuras que se recolectaron en las visitas de campo que dan información del material y estado de las viviendas.

Las funciones de daño de profundidad son relativas (Tabla 104) a las categorías de construcciones y el factor de material (mf), este último factor (mf) es asignado según el tipo de material empleado y hace relación a la fragilidad intrínseca de la estructura, en el caso del área de estudio la categoría que se utilizó fue Residencial debido al contexto de vivienda de los espacios territoriales de capacitación y reincorporación.

En la Tabla 106 se observa los factores implementados en las construcciones del área de estudio, en el caso de estructura de alojamiento se da un rango de valores para profundidad de inundación y daño debido a que son varias viviendas las que se encuentran en esta categoría y toman diferentes valores en la profundidad de la inundación relativo a la ubicación del elemento expuesto en el predio de estudio

La profundidad de inundación ( $h$ ) se obtiene de la mancha de calado extraído del análisis de amenaza por inundación. En el cual obtienen los valores de  $h$  para cada vivienda, se optó por emplear el valor máximo de inundación que estaba presente en el polígono de la vivienda por medio de la herramienta de zonal.statistic de Arcmap, al extraer el valor máximo de la inundación presente en la vivienda.

Tabla 106: Factores en la implementación de la metodología para las estructuras antiguo ETCR La Fila.

Construcción	Categoría	Tipo de material	mf	Profundidad inundación	Daño (%)
Estructura de alojamiento	Residencial	Mampostería	1	0 - 0,21m	0 - 17

### 15.2.2.2. Mapa de vulnerabilidad por Inundación

La representación de las viviendas afectadas por inundación se observa en la Figura 220 en la que se muestra el porcentaje de daño con respecto al calado. En la Figura 220 se observa que la lejanía de las viviendas a las quebradas señaladas en la Figura 200 (Quebrada NN1, NN2 y NN3) hace que las viviendas se encuentren muy poco afectadas por el nivel del agua durante un evento de inundación. Se logra identificar que 8 viviendas podría estar afectada levemente por la mancha de inundación.

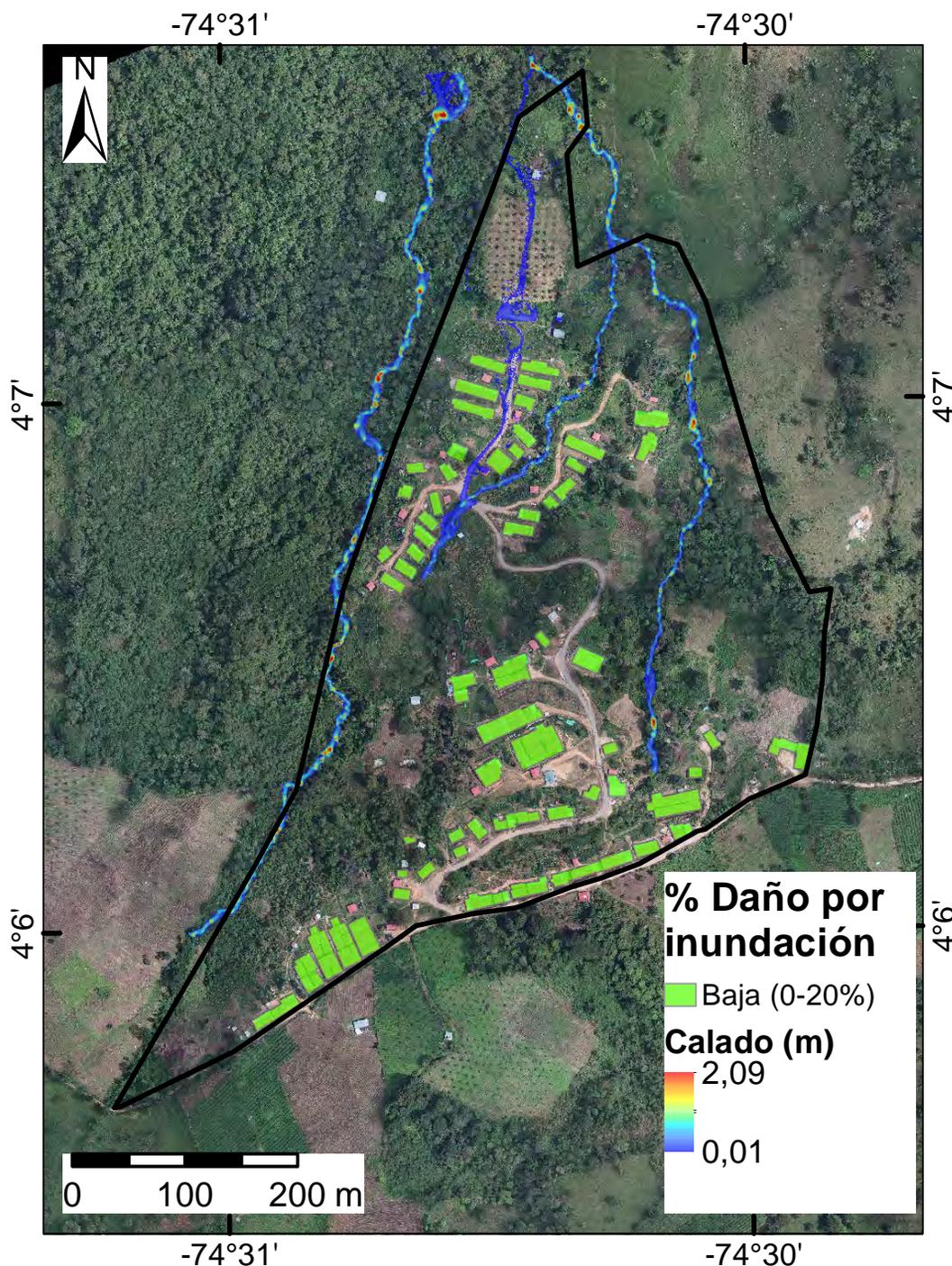


Figura 220: Daño por inundación en el antiguo ETCR La Fila

### 15.2.3. Vulnerabilidad por avenidas torrenciales

En la Figura 221 se presenta la categoría de vulnerabilidad en la que se encuentran las viviendas ante una avenida torrenciales. Dado el gran poder destructivo de estos fenómenos esta valoración se realiza en dos categorías:

alta, para las viviendas que son alcanzadas por el flujo y baja para las que no. No se encuentran viviendas afectadas en vulnerabilidad alta.

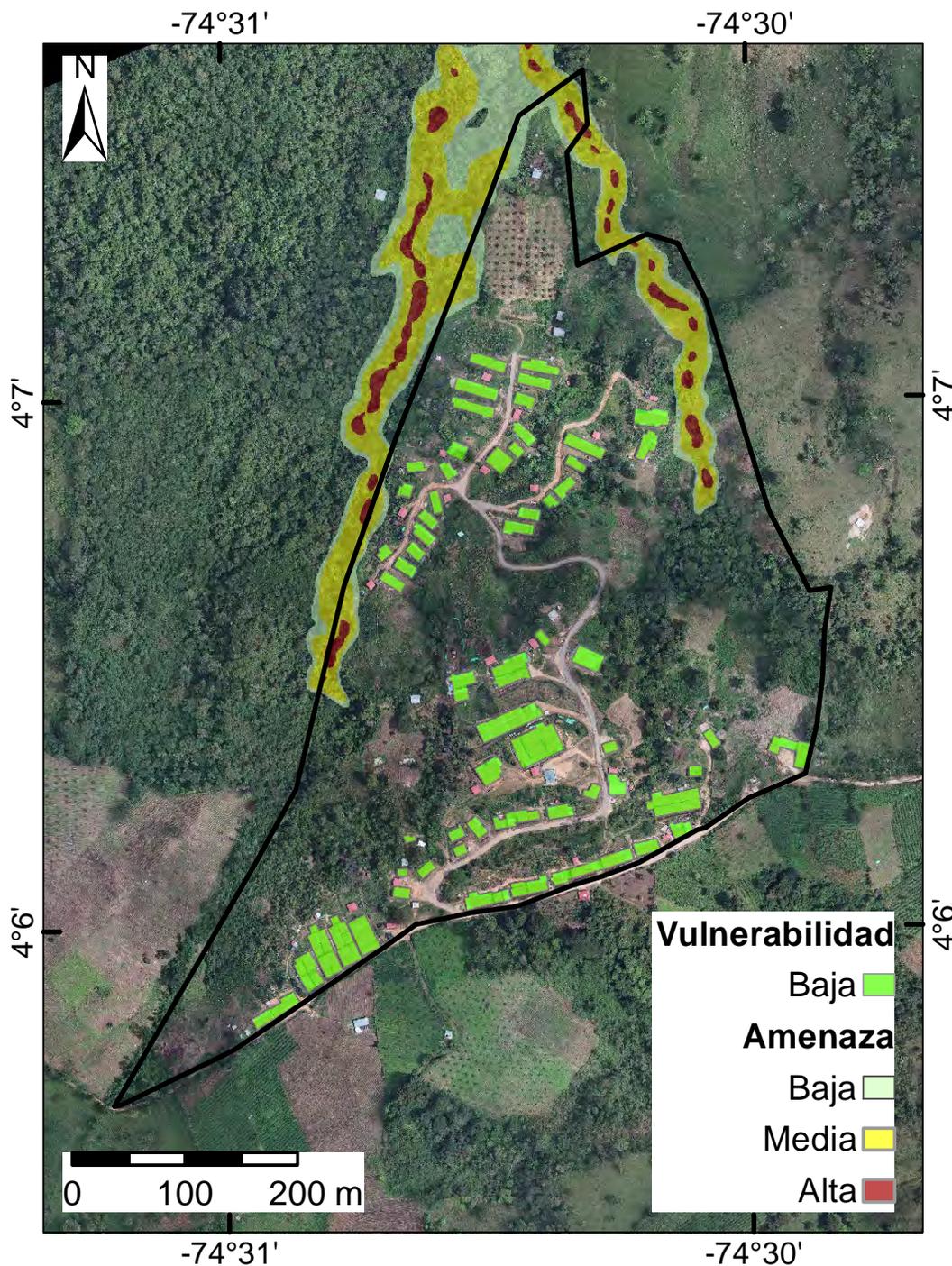


Figura 221: Daño por avenidas torrenciales en el antiguo ETCR de La Fila.

# 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*.
- Bohórquez, J. E. T. (2013). Evaluación de la vulnerabilidad social ante amenazas naturales en manzanillo (colima). un aporte de método. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, 2013*(81), 79–93.
- 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.
- J, P., L, T., y D, O. (2017). Métodos para la evaluación del riesgo de inundación fuvial: revisión de literatura y propuesta metodológica para ecuador. *Maskana*.
- J, P., L, T., y Orellana. (2020). Assessment of microscale economic food losses in urban and agricultural areas: case study of the santa bárbara river, ecuador. *Natural Hazard*.
- Kaynia, A., Papatoma-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.
- Pistrika, A. (2010). Flood damage estimation based on food simulation scenarios and a gis platform. *European Water*.
- 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. (2015). *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.
- Yamazaki D, H. Y., Watanabe S. (2018). Global food risk modeling and projections of climate change impacts. *Global food hazard: applications in modeling, mapping, and forecasting.*.

## Capítulo 16

# Riesgo

En el presente capítulo se presenta la evaluación del riesgo cuantitativo asociado a los eventos amenazantes de movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones. 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, 2015). El riesgo específico es definido por la Ecuación 16.1 y el riesgo total de cada elemento expuesto se considera como la suma de los riesgos específicos para todo tipo de evento (Ecuación 16.2).

$$R_s = P(H_i) * V * E \quad (16.1)$$

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 (\$)

$$\sum R_t = R_{Inun} + R_{AVT} + R_{MenM} \quad (16.2)$$

Donde:

- $R_t$  = riesgo total
- $R_{Inun}$  = riesgo específico por inundación
- $R_{AVT}$  = riesgo específico por avenidas torrenciales
- $R_{MenM}$  = riesgo específico por movimientos en masa

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 15.2, respectivamente. A continuación, se presentan los resultados del riesgo específico y total para los elementos expuestos actuales en el antiguo ETCR La Fila.

## 16.1. 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 192). 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 217) 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 107 se presentan las probabilidades estimadas para cada categoría de amenaza por movimientos en masa, mientras que para los eventos de inundación y avenidas torrenciales la probabilidad asociada a la amenaza se determina como el inverso del periodo de retorno, el cual corresponde al caudal máximo estimado para un periodo de 500 años.

Tabla 107: Probabilidad espacial de la amenaza por movimientos en masa

<i>Categoría</i>	<i>%</i>	<i>Probabilidad</i>
Baja	12.27	0.12267
Media	83.94	0.83943
Alta	3.79	0.03790

Por otra parte, la vulnerabilidad y los daños esperados por los distintos tipos de eventos obedecen al análisis descrito en las secciones 15.2.3, 15.2.2 y 15.2.1, en las cuales se determinó cuantitativamente la probabilidad (0-1) de que se generen daños ante la ocurrencia de las amenazas. 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 agencia nacional de reincorporación y normalización (ARN) estipulado en la resolución 472 del 31 de Julio del 2018. El valor comercial aproximado de cada polígono existente en el antiguo ETCR La Fila se estima de \$ 114.426.099.

La tabla 108 presenta los resultados de las Pérdidas Esperadas Anuales (PEA) en pesos (\$) para algunas viviendas sujetas a movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundación en el antiguo ETCR La Fila. Los cuales se pueden identificar espacialmente haciendo uso del campo "Vivienda Expuesta" de la Tabla 108 y la Figura 222.

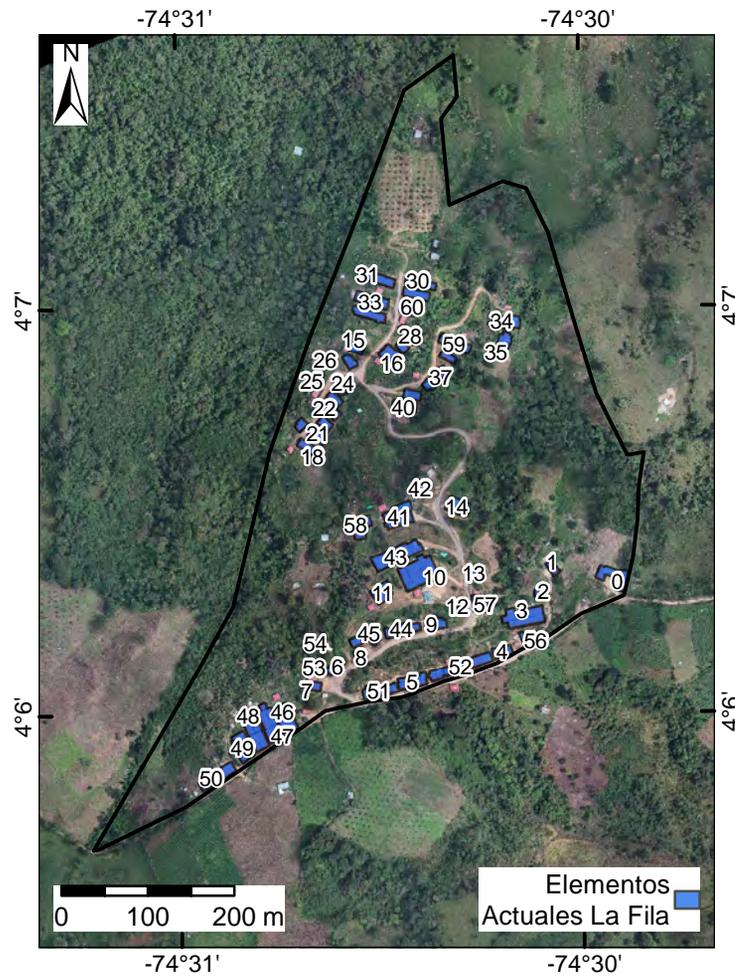


Figura 222: Elementos actuales dentro del antiguo ETCR La Fila.

A partir de los resultados obtenidos, de todas las viviendas evaluadas (Figura 222), se identifica que el 75,4% de las viviendas expuestas en el escenario actual presentan afectaciones por movimientos en masa, que representa pérdidas esperadas anuales de \$ **197.674.962**, el 11,5% por inundación, que representa pérdidas esperadas anuales de \$ **83.225**, y no se evidencia afectaciones por avenidas torrenciales. Con un total de \$ **197.758.188** pérdidas anuales esperadas teniendo en cuenta todos los eventos mencionados. A partir de los resultados, se logra evidenciar que los movimientos en masa es el evento que mayor número de viviendas afecta y que genera los mayores impactos económicos para las estructuras actuales en el antiguo ETCR La Fila.

Tabla 108: Pérdidas Esperadas Anuales (PEA) del escenario actual de algunas viviendas expuestas del antiguo ETCR La Fila.

Viviendas Expuestas	PEA Inundación (\$)	PEA AVT (\$)	PEA MenM (\$)	PEA Total (\$)
0	0	0	4.336.749	4.336.749
16	20.066	0	4.336.749	4.356.815
17	10.457	0	3.883.850	3.894.307
30	9.800	0	4.336.749	4.346.549
42	0	0	0	0

## 16.2. 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.

## 16.3. 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 177 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 La Fila actualmente cuenta con 228542,71  $m^2$ , 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 116192,83 m<sup>2</sup> para localizar las infraestructuras futuras.

Para la implantación de las viviendas rurales, se plantean predios de 300 m<sup>2</sup> con el fin de asegurar pequeñas huertas y jardines privados en cada predio.

En La Figura 223 se observa una posible distribución de los 177 predios necesarios. De los 116192,83 m<sup>2</sup> disponibles para implantar las estructuras futuras, se utilizan 59732,51 m<sup>2</sup> para viviendas y vías de acceso, resultando así un espacio disponible de 56460,32 m<sup>2</sup> para ubicar usos complementarios y espacio público.

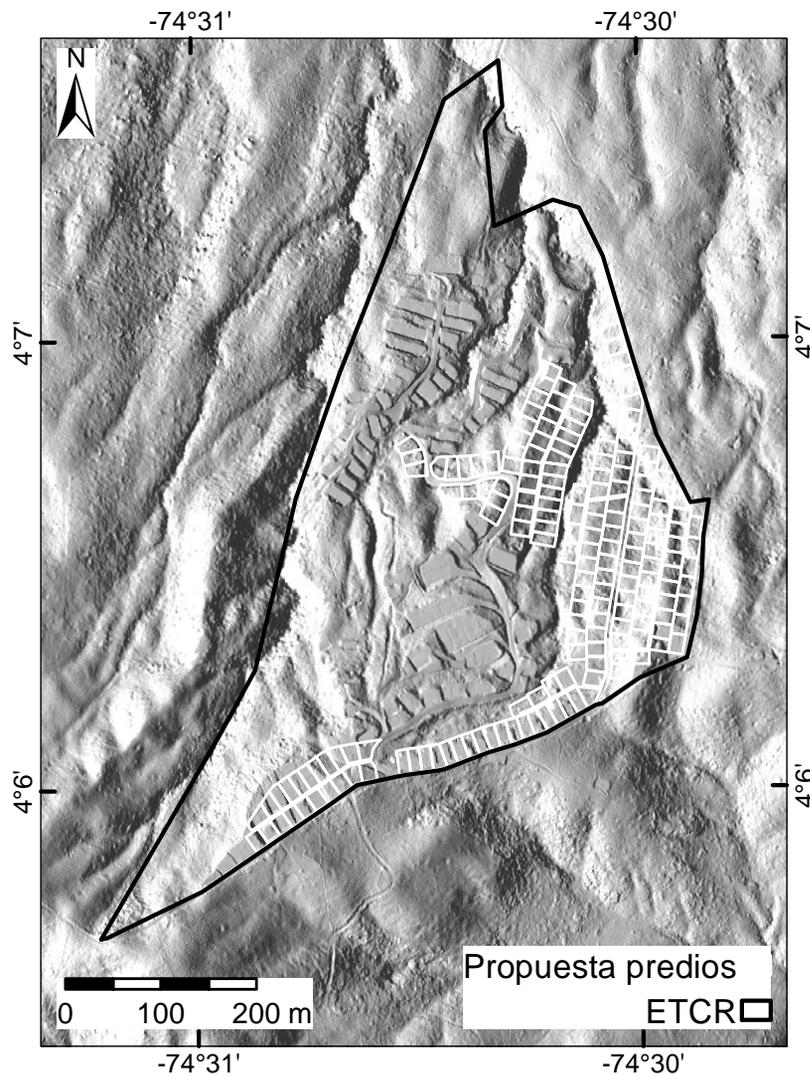


Figura 223: Propuesta predios para viviendas

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 224 uno recua-

dros correspondientes a las 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 (el actual ejercicio la considera de  $55,8 m^2$ ).

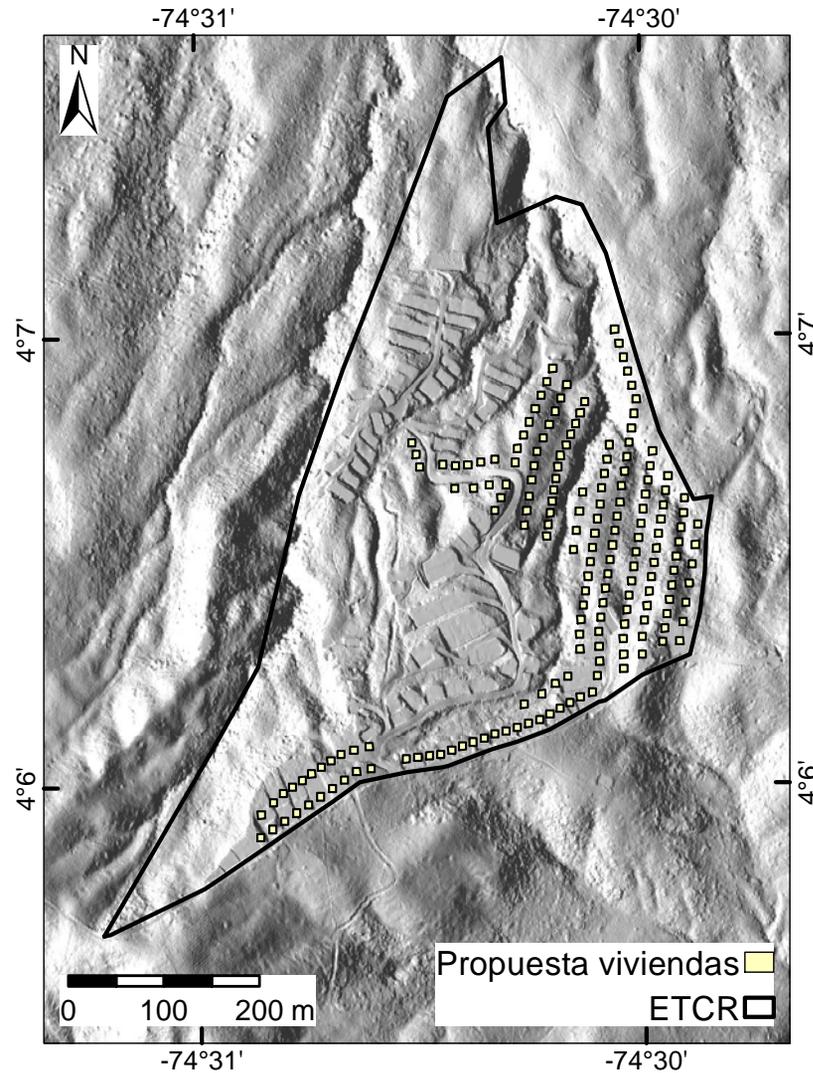


Figura 224: Viviendas guías

La ubicación de los predios se encuentra condicionado principalmente por la presencia de restricciones normativas y la restricción existente para las PTAR. De igual manera se resalta la presencia de zonas con categoría media por movimientos en masa en la mayoría de sus ubicaciones dado que la categoría baja se encuentra concentrado puntualmente en la parte sur central que entra en cruce con las restricciones normativas.

### 16.3.1. 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 225). Los prototipos de vivienda comprenden un área de entre 52,8 y 55,55m<sup>2</sup>. El valor económico de cada vivienda se estima de \$ 38.995.699.



Figura 225: Prototipo vivienda rural proyectada

#### 16.3.1.1. Evaluación de riesgo prospectivo

A partir de las características tipológicas y materiales proyectados para la construcción de las viviendas permanentes se establece la fragilidad y tipo de material para la cuantificación de la vulnerabilidad por movimientos en masa e inundación, respectivamente. La metodología empleada es descrita en la sección 15.2.1.1.

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 mampostería 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 109). Todos los valores presentados anteriormente se tomaron bajo el mismo criterio para las 180 viviendas que se tienen en consideración.

Igualmente, el tipo de material a considerar en el análisis de daños por inundación son estructuras de mampostería de categoría residencial, por ende se asigna el valor de 1 para el factor de material (mf).

Tabla 109: 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 16.1). La amenaza evaluada corresponde a los valores descritos en la Tabla 107.

Con respecto a la vulnerabilidad en los distintos eventos; en la Figura 226 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 226a 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 226b 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 227.

Con respecto a los eventos de inundación y avenidas torrenciales en las Figuras 228 y 229 se presenta el daño y la vulnerabilidad asociada al calado y mancha de amenaza, respectivamente.

Finalmente, como ejercicio preliminar a las viviendas proyectadas se estima el riesgo específico por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundación, así como el riesgo total para cada vivienda en el antiguo ETCR La Fila. En la Tabla 110 se presenta los riesgos económicos (pesos - \$) asociados a la posible exposición de algunas viviendas según la ubicación preliminar de las viviendas, las cuales son identificados espacialmente en la Figura 230.

A partir de los resultados obtenidos, de todas las viviendas evaluadas (ver Figura 230), se identifica que el 64,4 % de las viviendas expuestas en el escenario

Tabla 110: Pérdidas Esperadas Anuales (PEA) del escenario proyectado de algunas viviendas expuestas en el antiguo ETCR La Fila

Viviendas Expuestas	PEA MenM (\$)	PEA Inundación (\$)	PEA AVT (\$)	PEA Total (\$)
2	1.477.937	0	0	1.477.937
3	0	0	0	0
26	1.464.800	0	0	1.464.800
28	256.776	0	0	256.776

proyectado presentan afectaciones por movimientos en masa, que representa un total de **\$ 161.305.418** pérdidas esperadas anuales. Mientras que la posible afectación por inundación y avenidas torrenciales se redujo completamente.

Al comparar el escenario actual y proyectado, se puede evidenciar que para los movimientos en masa se presenta un reducción en la cantidad de viviendas expuestas que son afectadas en el escenario proyectado, y para avenidas torrenciales e inundación se redujo completamente la exposición. Con respecto a los costos asociados a las pérdidas esperadas anuales son mayores las estimadas en el riesgo actual. Cabe destacar, que la escala comparativa entre los escenarios difiere en el número de viviendas ubicadas en el espacio territorial, se evalúan 61 y 180 viviendas para el riesgo 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.

#### 16.4. 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.

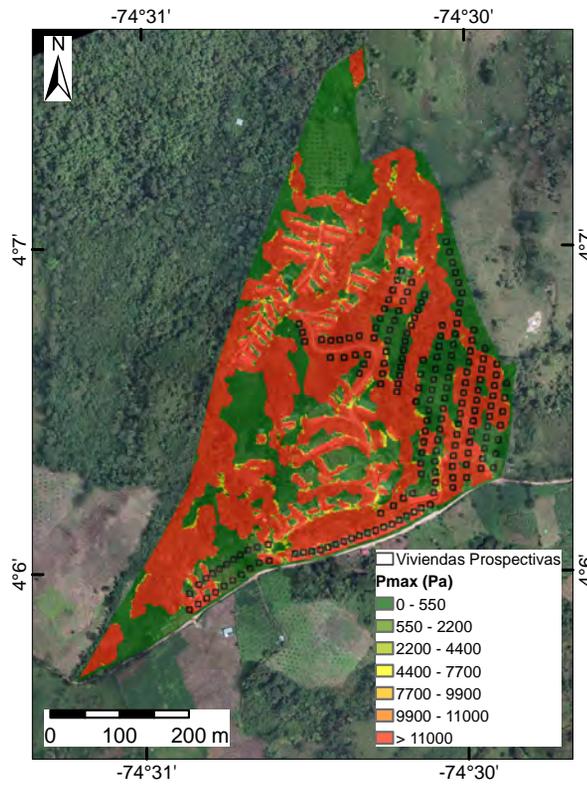
La evaluación de riesgo para el antiguo ETCR La Fila tomando como referencia los siguientes valores, mostrados en la Tabla 111, permite evidenciarse que en términos generales el riesgo es de medio a bajo, siendo el motivo de gestión directa los factores amenazantes de movimientos en masa e inundaciones; 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 111

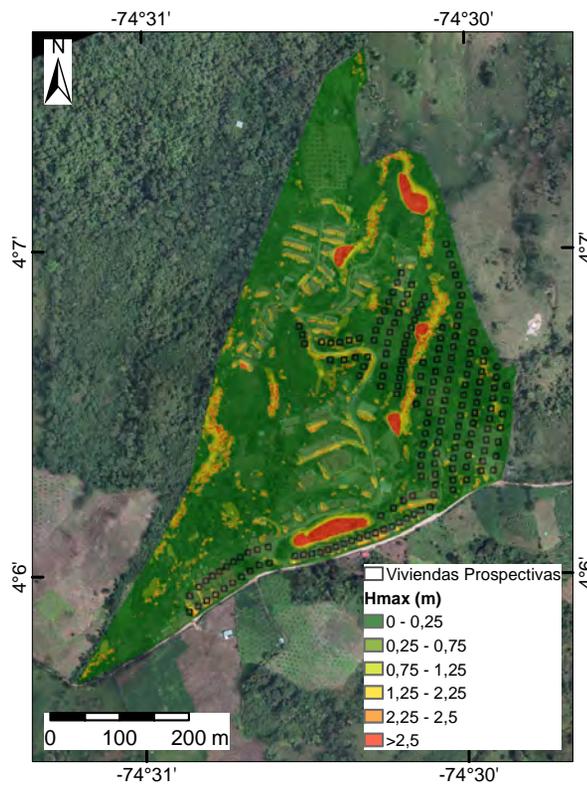
Rangos para valoración del riesgo			
<b>0-3</b>	3, 1-5, 9	6-8, 9	9-11, 9
<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio-alto</b>	<b>Alto</b>

#### 16.4.1. Matriz 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.



(a) Presión del impacto ( $P_{max}$ )



(b) Profundidad del depósito ( $H_{max}$ )

Figura 226: Mapas de propagación por movimientos en masa, escenario prospectivo en el antiguo ETCR La Fila.

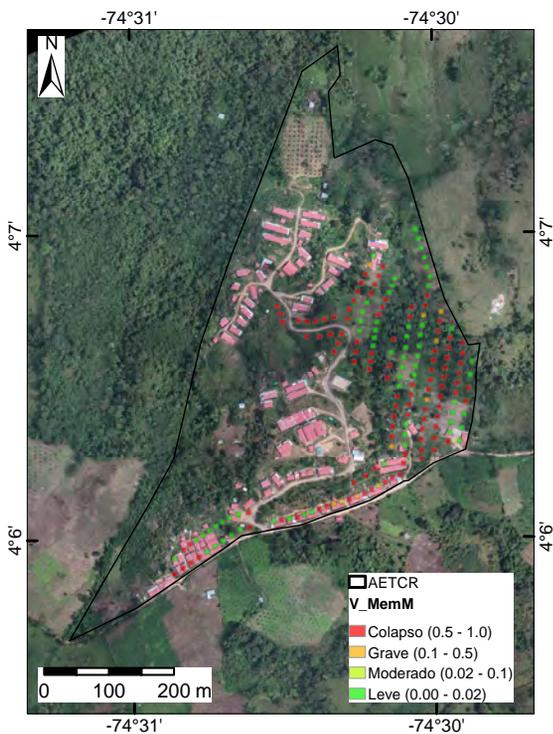


Figura 227: Vulnerabilidad por movimientos en masa de viviendas proyectadas en el antiguo ETCR La Fila

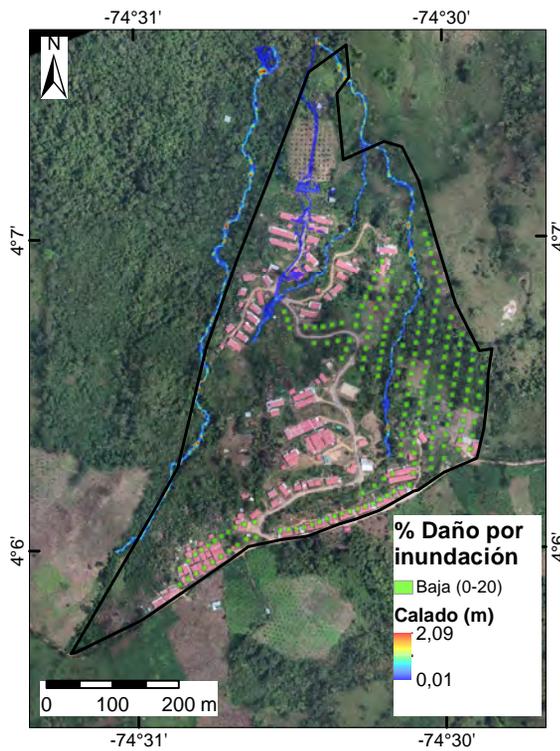


Figura 228: Daño por inundación en viviendas proyectadas en el antiguo ETCR La Fila

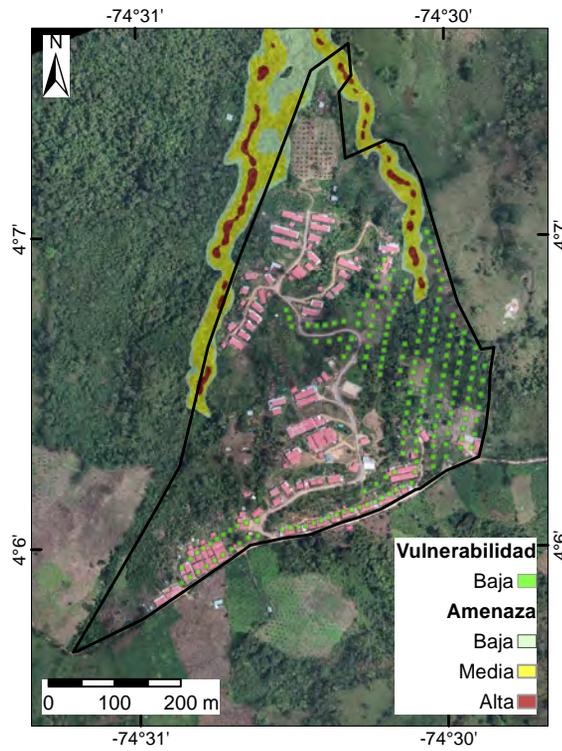


Figura 229: Vulnerabilidad por avenidas torrenciales en viviendas proyectadas en el antiguo ETCR La Fila

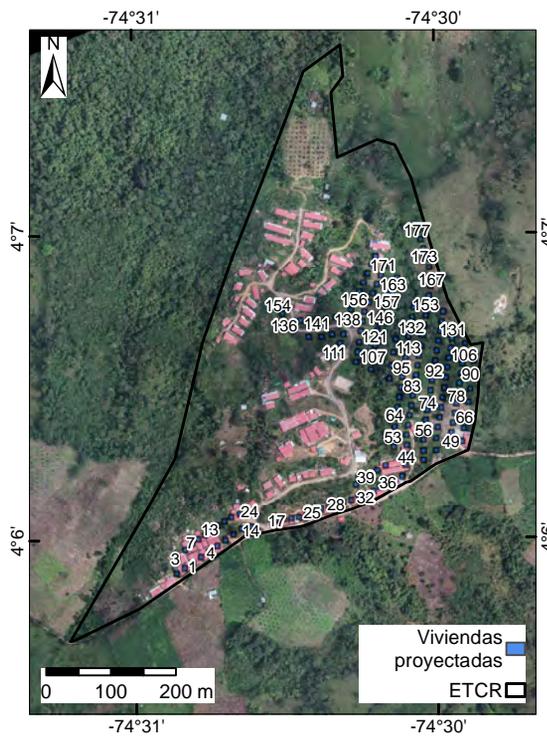


Figura 230: Viviendas proyectadas dentro del antiguo ETCR La Fila

Amenaza	0-0,3 remoto - 0,4-0,6 ocasional - 0,7-0,8 moderado - 0,9-1 frecuente	Impacto						Fragilidad				Capacidad				Nivel de Riesgo
		0-0,3 Marginal - 0,4-0,6 Grave - 0,7-0,8 Crítica - 0,9-1 Desastrosa						0-0,3 Baja - 0,4-0,7 Medio - 0,8-1 Alta				0-0,3 Altas - 0,4-0,7 Medio - 0,8-1 Baja				
		Humano	Ambiental	Viviendas	Productivo	Equipamientos	Evaluación	Social	Económica	Estructural	Evaluación	Organizativa	Gestión y Cooperación	Apropiación	Evaluación	
AVENIDAS TORRENCIALES	0	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,5	0,5	0,8	1,8	0	0,8	0	0,8	3
INUNDACIONES	0,1	0	0,1	0,1	0,5	0,1	0,8	0,5	0,5	0,8	1,8	0	0,8	0	0,8	3,5
MOVIMIENTO EN MASA	0,4	0	0,1	0,5	0,1	0,1	0,8	0,5	0,5	0,8	1,8	0	0,8	0	0,8	3,8

Figura 231

# Referencias

SGC, S. G. (2015). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Servicio Geológico Colombiano-SGC.

## Capítulo 17

# 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.

### 17.1. Medidas no estructurales

Acorde al Artículo 13 del Decreto 1807 del 2014 *“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 14, 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 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.

#### Avenidas Torrenciales:

- Establecer cultivos que permitan el control de erosión y sedimentos en las laderas.
- Supervisión y monitoreo del transporte de escombros.
- Implementación de programas para la limpieza de cauces.
- Instaurar estrategias de reforestación en retiros de quebrada.

- Se recomienda crear vínculos con la comunidad como planes de educación ambiental, referente a las zonas de retiro de las quebradas.

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.

### 17.1.1. 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, De Vita, y Guzzetti, 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, Crozier, y Smith, 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 24.

#### **17.1.1.1. 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 232, 233 y 234, 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 visualizar en las Figuras que las zonas son definidas de la siguiente manera alerta verde para la estación La Granja oscila entre 0 y 20 mm/día para lluvia acumulada y para lluvia acumulada antecedente 0 a 450 mm en 30 días de acumulado, para la estación Ospina Perez oscila entre 0 y 15 mm/día para lluvia acumulada y para lluvia acumulada antecedente 0 a 350 mm en 30 días de acumulado y para la estación Pandi, oscila entre 0 y 20 mm/día para lluvia acumulada y para lluvia acumulada antecedente 0 a 300 mm en 30 días de acumulado. En alerta amarilla para la estación La Granja oscila entre 20 y 50 mm/día para lluvia acumulada y para lluvia acumulada antecedente entre 450 y 600 mm en 30 días de acumulado, para la estación Ospina Perez oscila entre 15 y 30 mm/día para lluvia acumulada y para lluvia acumulada antecedente entre 350 y 450 mm en 30 días de acumulado, y para la estación Pandi oscila entre 20

y 35 mm/día para lluvia acumulada y para lluvia acumulada antecedente entre 300 y 400 mm en 30 días de acumulado. En alerta naranja para la estación La Granja oscila entre 50 y 75 mm/día para lluvia acumulada y para lluvia acumulada antecedente oscila entre 600 y 800 mm en 30 días de acumulado, para la estación Ospina Perez oscila entre 30 y 50 mm/día para lluvia acumulada y para lluvia acumulada antecedente oscila entre 450 y 600 mm en 30 días de acumulado y para la estación Pandi oscila entre 35 y 60 mm/día para lluvia acumulada y para lluvia acumulada antecedente valores superiores a 400mm para 30 días de acumulado, valores superiores a la zona naranja son clasificados como alerta roja.

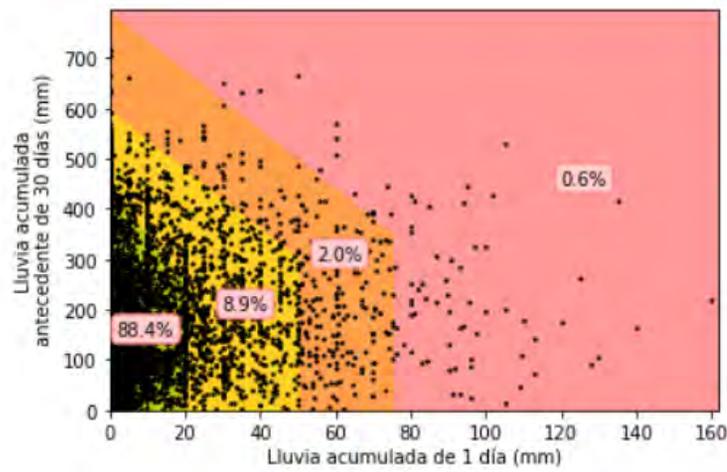


Figura 232: Umbral de lluvia estación La Granja IDEAM

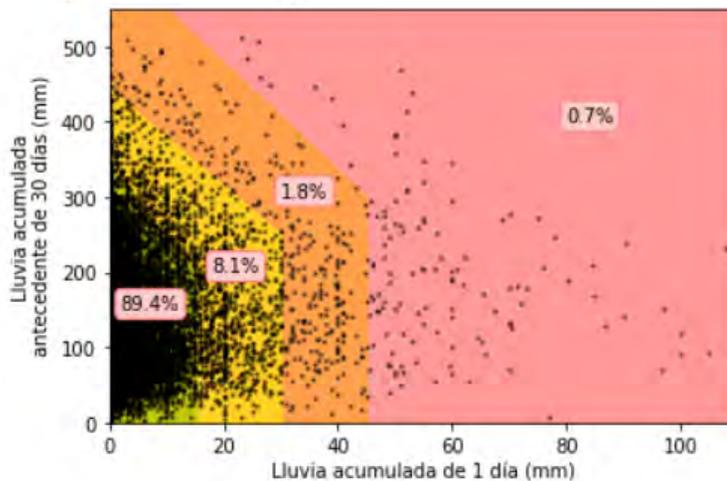


Figura 233: Umbral de lluvia estación Ospina Perez IDEAM

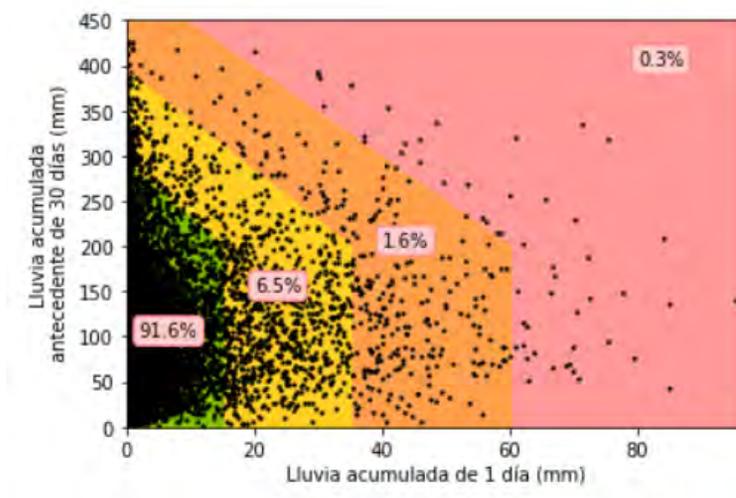


Figura 234: Umbral de lluvia estación Pandi IDEAM

### 17.1.1.2. Umbrales de lluvia de satélite CHIRPS escala mensual

Para determinar los umbrales en la lluvia estimada por satélite se sigue el mismo procedimiento mencionado anteriormente, pero en este caso, a escala mensual; adicionalmente, es importante resaltar que el análisis de los umbrales se realiza a nivel de cuenca, es decir, se tiene a consideración la lluvia, mostrada por CHIRPS, que cae sobre todo el área de interés, en este caso la la cuenca de la quebrada La Laja. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 235, donde se compara la lluvia acumulada de un mes contra la lluvia acumulada antecedente de 3 meses.

Podemos observar en la Figura 235 que las zonas son definidas de la siguiente manera alerta baja(verde) oscila entre 0 y 150 mm/mes, para alerta media(naranja) oscila entre 150 y 200 mm/mes para lluvia acumulada, valores superiores a los anteriores son clasificados como alerta alta (zona roja).

### 17.1.1.3. 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 y Glade, 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 y Loigge, 2018).

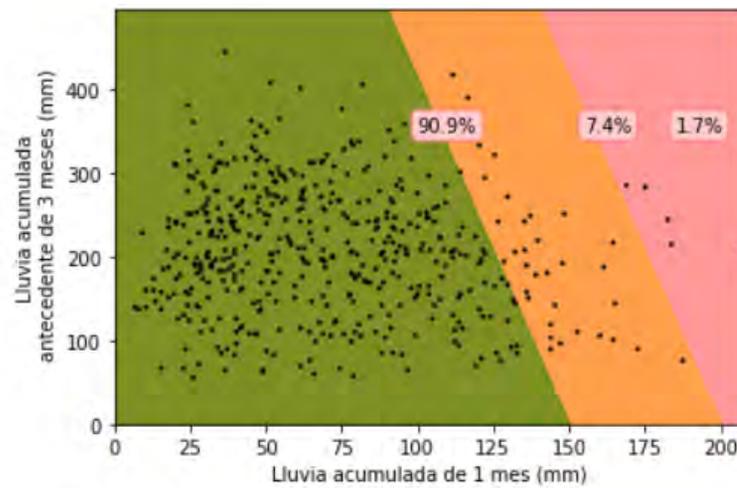


Figura 235: Umbral de lluvia para satélite CHIRPS cuenca La Laja

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.

### 17.1.2. 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.

Debido a las condiciones resultantes del cruce de variables normativas y amenazas, se plantea como estrategia de mitigación no estructural la creación de espacio público que para este caso es predominantemente libre con zonas habilitadas para su ocupación, se recomienda la revegetación en los bordes de las zonas de amenaza para evitar la ocupación del suelo. esta distribución en área se observa Tabla 112.

Tabla 112: Áreas aprovechamiento del suelo

Descripción	Área $m^2$	Estrategia
Área bruta antiguo ETCR	228542,71	
Restricciones normativas	101761,55	
Área neta antiguo ETCR	126781,16	
Amenaza por mvto en masa alta	2466,71	espacio público libre
Amenaza por inundación	2787,44	espacio público libre
Amenaza por avenidas torrenciales	5334,18	espacio público libre
Edificable vivienda	59732,51	
Espacio adicional edificable	56460,32	espacio público

## 17.2. 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 236, se dan a conocer las obras recomendadas para su ejecución.

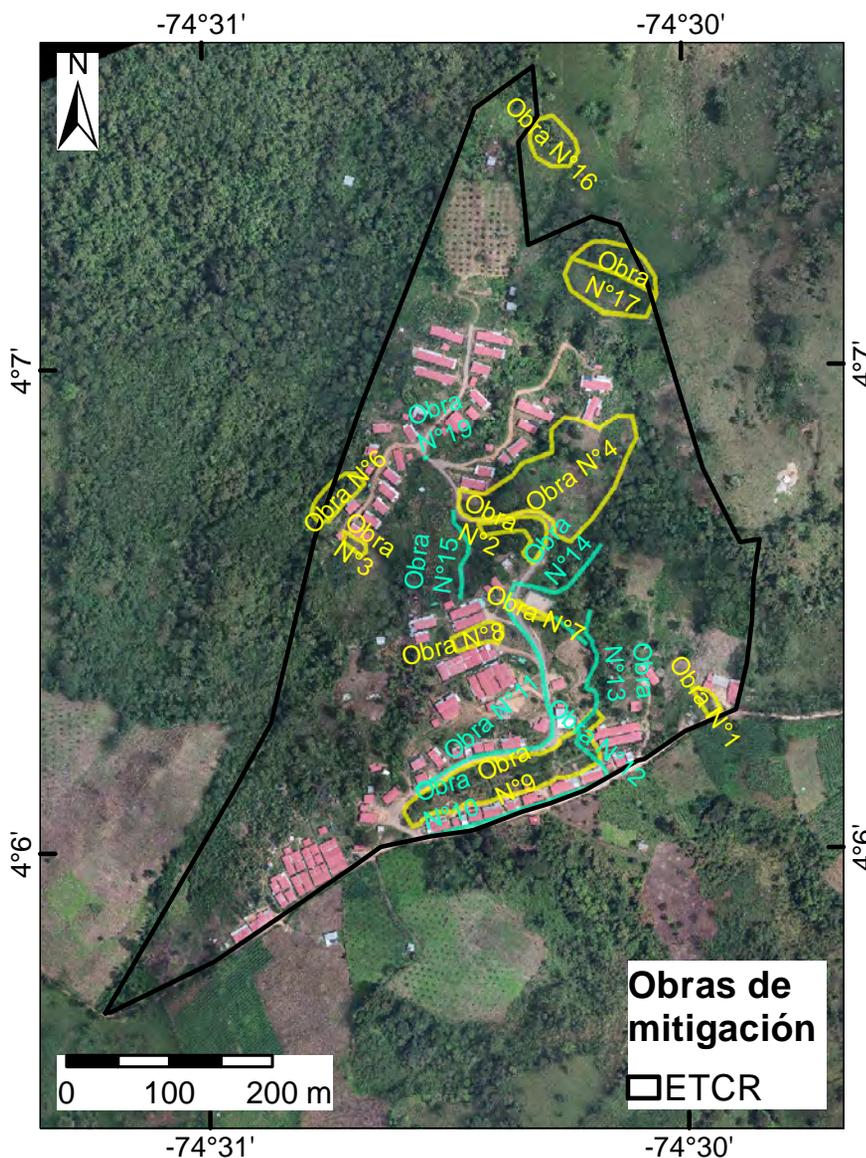


Figura 236: Ubicación obras de mitigación y remediación

### 17.2.1. Obra N°1, 2, 3, 4 y 5 - Modificación 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.
- Generar curvaturas suavizando el terreno.
- Generación de bermas.
- Remoción de material en la cabecera del talud.

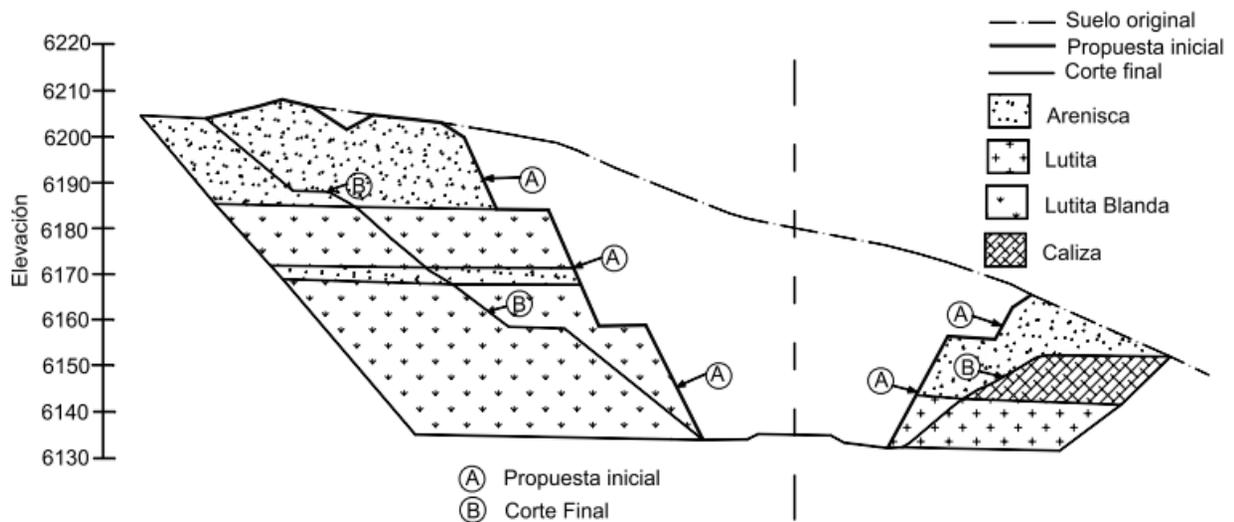


Figura 237: Modificación de geometría de taludes (Suárez, 2001)

La obra N°1 corresponde a la zona que se encuentra tras la construcción denominada como Hostal, esta zona ha sido antes excavada con la intención de obtener material tipo arena, estas zonas fueron llenas nuevamente con material no selecto. Es necesario el abatimiento de la pendiente por corte y conformación del talud en la zona determinada. A 10m del corte de la excavación actual se encuentra un poste que hace parte de la red eléctrica, debe respetarse la distancia existente al poste y conformarse el talud a partir de ese punto. Debido a la altura es posible la generación de una sola pendiente entre los límites del polígono (Figura 236) sin considerar terrazas, posterior a la conformación del

talud se debe sembrar vegetación mediante el uso de biomantos con la intención de evitar la erosión y formación de surcos y cárcavas en el material arenoso (Figura 238).

Para la obra N°2 se recomienda el abatimiento de la pendiente de los taludes en la zona demarcada, los cuales son casi verticales. Es recomendable trabajar con una pendiente inferior a los  $35^\circ$  y con taludes que no superen los 7m, la aguas que escurren se dirigen al canal existente el cual no se encuentra revestido por lo que se recomienda el revestimiento en mortero con canto rodado no mayor  $\phi = 10cm$ . Al igual que en la obra N°1 es necesaria la implementación de biomanto como material que evite la erosión disminuya la infiltración en el terreno mientras se restituye la vegetación.

En la obra N°3 se presenta caída de material debido a la excavación realizada para la extracción de arena. Al igual que las demás soluciones se sugiere el cambio a una pendiente no mayor a  $35^\circ$  e implementación de biomantos.



(a) Biomantos (Geopolimeros SAS, 2018)



(b) Talud Obra N°3 (Extracción de arena)

Figura 238: Protección con biomantos

En la sección 12.8 se realiza el análisis de estabilidad para sectores críticos, en este análisis de determino la necesidad de cambio de geometría en las zonas de los cortes C6 y C10 correspondientes a las obras N°5 y 4 respectivamente.

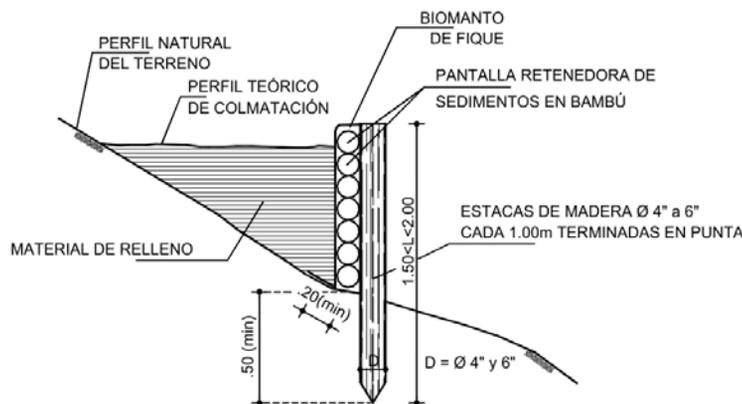
El área cubierta por el corte C6 se ubica en la zona norte, en el análisis (2D) se determina que es necesario realizar cambio de geometría mediante la generación de terraza intermedia. El corte C10 se ubica sobre una ladera de pendiente pronunciada con viviendas al final de este, se recomiendan varios niveles de terrazas acorde al polígono establecido (Figura 236). Además, deben sumarse medidas de protección superficial contra la erosión como los biomantos

de fibras vegetales ya mencionados.

### 17.2.2. Obra N°6 - Trinchos

Los trinchos son estructuras de madera, donde elementos verticales son hincados en el terreno y están unidos mediante elementos horizontales que retienen un material de relleno tras ellos. El objetivo de los trinchos es impedir la formación de surcos y cárcavas por escorrentía, además del transporte de sedimentos a lo largo de la ladera (Suárez, 2001).

La estructura recomendada consta de estacones inmunizados de  $\phi = 10\text{cm}$  y 2m de longitud, donde 1m se encuentra enterrado y se encuentran separados cada 2m. Los estacones se encuentran unidos por medio de guaduas que cubren toda la altura (1m) y como material de relleno material de préstamo de la misma zona. las bermas construidas con los trinchos deben contar con vegetación.



(a) Diseño recomendado (Suárez, 2001)



(b) Ejemplo (Revista occidental, 2015)

Figura 239: Esquema trinchos



(a) Obras zona Sur



(b) Obras zona central

Figura 240: Distribución obras

### 17.2.3. Obra N°7 y 8 - Protección superficial

Estas 2 obras se encuentran ubicadas en zonas que se caracterizan por taludes de difícil crecimiento de vegetación con presencia de rocas con tamaños que van desde gravas hasta bloques. Por esta razón se sugiere el uso de geosintéticos. Se recomienda la instalación de mantos permanentes tipo TRM. Son esterillas tridimensionales de estructuras abiertas, compuesto por fibras sintéticas no degradables con resistencia a los rayos UV. Proporcionan protección inmediata contra la erosión, permite el crecimiento de vegetación y proporciona refuerzo a largo plazo de la vegetación ya establecida (Figura 241).

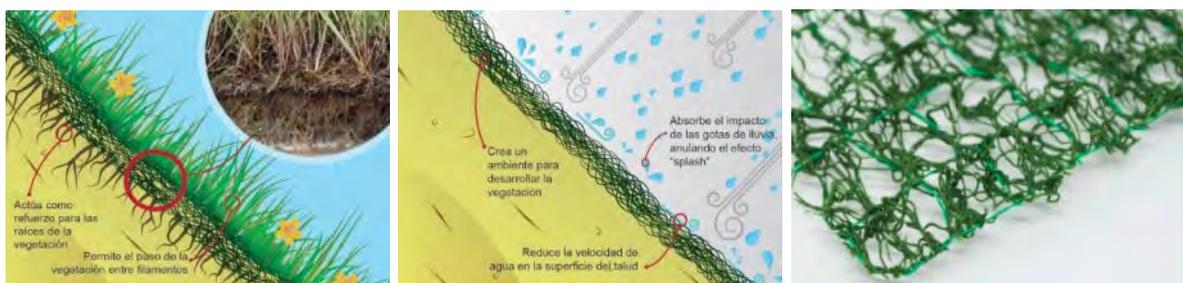


Figura 241: Geosintético permanente tipo TRM (Prodalam, 2020)

### 17.2.4. Obra N°9 - Revegetación y reforestación

Esta obra corresponde a la zona húmeda donde se forma la quebrada NN3, se recomienda la revegetación y reforestación de la zona con árboles acorde a la altitud como cajeto y roble, entre otras especies sugeridas por un experto, acordes a la condición de humedal que se presenta para proteger ambientalmente la quebrada NN3. Además se recomienda su constante limpieza y mantenimiento.

### 17.2.5. Obra N°10 y 11 - Cuneta vía

En las vías de la zona sur del antiguo ETCR no se evidencia obras de recolección y conducción de aguas lluvias. La ausencia de cunetas causa erosión y formación de surcos, se propone la construcción de dos obras correspondientes a cunetas a un costado de la vía para la evacuación de aguas lluvias (Figura 236). La Cuneta debe ser construida sobre material compactado tipo base granular, en concreto de  $f' = 21MPa$  según lo indicado en la Figura 242.

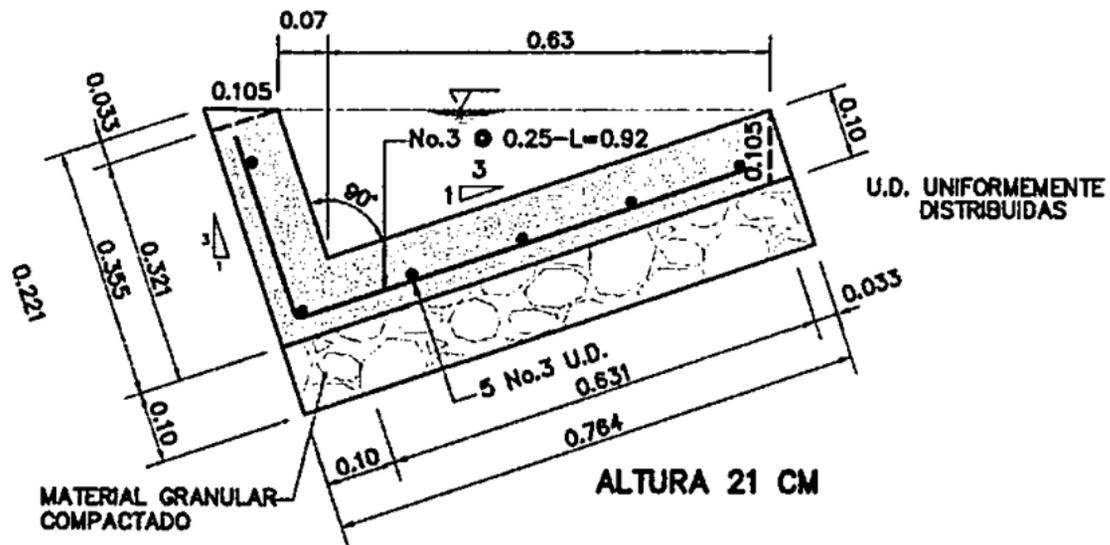


Figura 242: Cuneta vía (Secretaría de infraestructura física departamento de Antioquia, 2019)

### 17.2.6. Obra N°12 - Canal escalonado

Esta obra funciona como conexión entre la obra N°10 (Cuneta) y la obra N°13 (Canal #1). Consta de un canal escalonado en concreto ( $f' = 21MPa$ ) con una altura  $h=0,5m$ , longitud de escalón  $L=1,8m$  y  $d$  mínimo de  $0,5m$  como lo esquematiza la Figura 243a. Además se requiere de un área cubierta en roca para evitar socavación a la salida del canal escalonado que se conecta con la obra N°11 (Figura 243b).

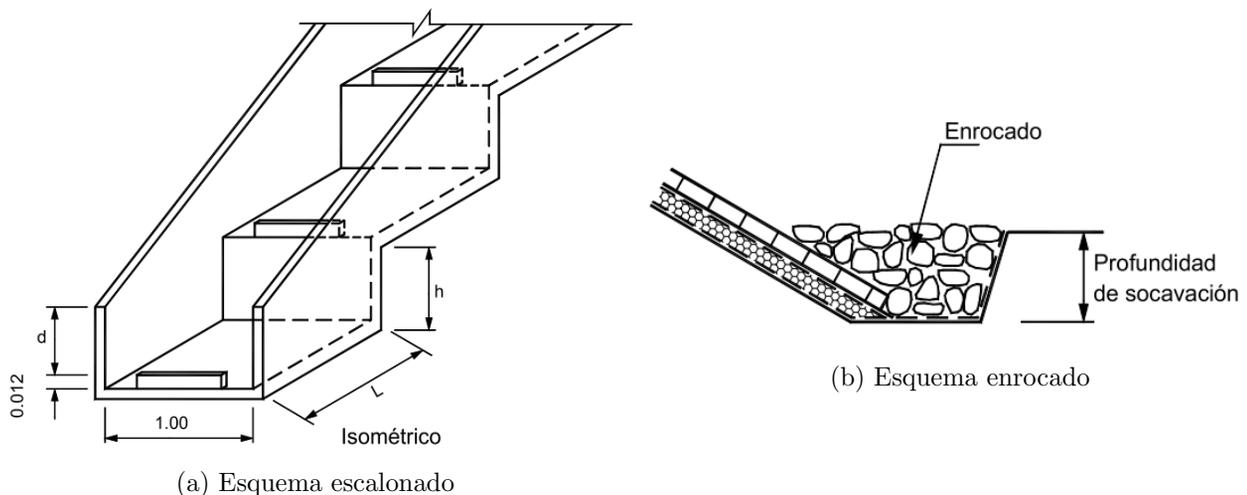
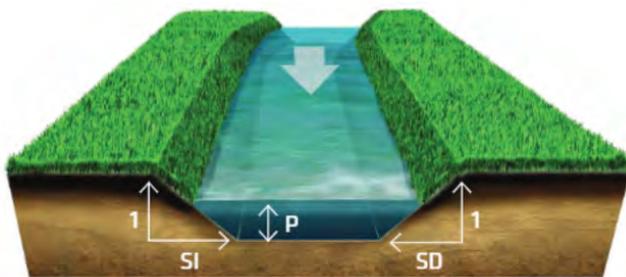


Figura 243: Canal escalonado(Suárez, 2001)

### 17.2.7. Obra N°13 - Canal #1

Los canales son estructuras de drenaje de sección transversal determinada (trapezoidal, semicircular, triangular o rectangular), que pueden estar revestidas o no, sino influye efectos erosivos sobre este. A la N°9 se suma la canalización de un tramo de la quebrada NN3 (Figura 244a). Se sugiere un canal trapezoidal con una pendiente de al menos 10 %, con 1,4m de ancho en la parte superior y pendiente en los taludes 2V:1H. Las caras del canal deben estar revestidas en grama hasta los hombros. Se debe instalar trinchos en madera en el canal al menos cada 50m (Figura 244b).



(a) Esquema canal (Tensar International corporation, 2012)



(b) Esquema trinchos (Universidad Católica de Colombia, 2016)

Figura 244: Esquema Canal #1

### 17.2.8. Obra N°14 - Canal #2

Este canal recibe las agua provenientes de la obra N°11 (cuneta) y son llevada a la quebrada NN3. Con la intención de intervenir lo menor posible esta corriente y fácil ejecución, se propone un canal trapezoidal construido a partir sacos con una mezcla suelo-cemento 6:1. Como se observa en la Figura 245, el canal debe contar con una sección mínima de 1,4m de ancho y 0,70m de profundidad, con disipadores en el mismo material cada 5m y enrocado de al menos 1,5m de ancho y 0,20m de espesor en el vertimiento a la quebrada NN3.

El canal debe contar con una pendiente minima del 10 %, durante su construcción al avanzar y profundizar el canal se debe aumentar la protección de las paredes del canal con un nivel mas de sacos. Considerar una distancia de al menos 0,3m entre la parte superior del canal y nivel del terreno, por lo que la profundidad total será de 1m.

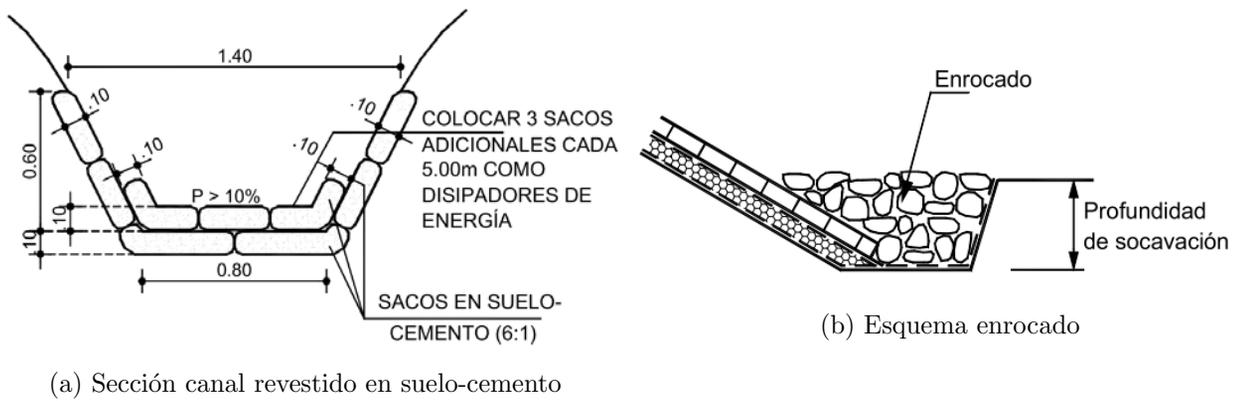


Figura 245: Canal #2(Suárez, 2001)

### 17.2.9. Obra N°15 - Canal #3

Para el canal #3 se propone también un canal trapecoidal en sacos de suelo-cemento, pero de menor dimensión (Figura 246). Este canal se construye con la intención de evacuar aguas que llegan a la vaguada por escorrentía y flujo superficial.

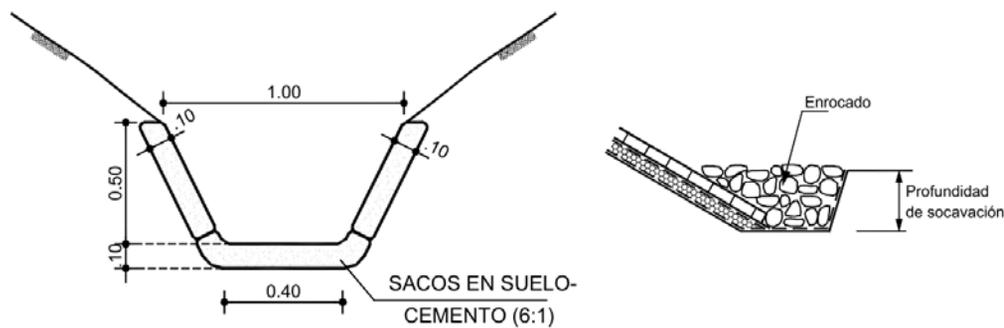


Figura 246: Sección canal revestido en suelo-cemento (Suárez, 2001)

En este canal agregar disipadores cada 5m y al final conectar una capa de enrocado de 1,5m de longitud y 0,20m de espesor con la intención de reducir la socavación en el empalme con el canal existente.

### 17.2.10. Obra N°16 y 17 - Reforestación

Se recomienda la siembra de bosque en la zonas especificadas al noreste, en estas zonas se evidencio movimientos no activos (Figura 236).Se propone la reforestación para aumentar la cohesión de suelo por el aporte de las raíces. El tamaño de los arboles debe ser acorde a la inclinación de la ladera, en una ladera con alta pendiente los arboles de gran tamaño aportan un sobrepeso que induce al movimiento (Figura 247).

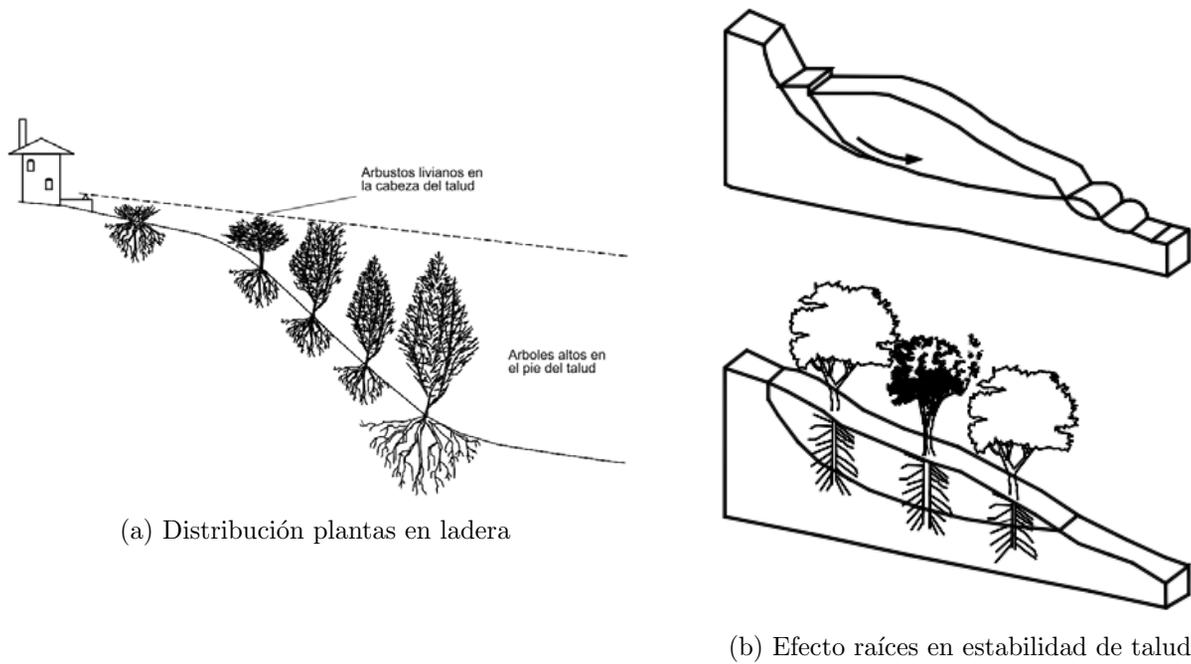


Figura 247: (Suárez, 2001)

### 17.2.11. Obra N°18 - 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° – 10°). 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 248).

Acorde a los análisis realizados en la sección 12.8 se sugiere la instalación de drenes horizontales para abatir el nivel de agua en la zona del corte C8. En la Figura 236, se presenta la ubicación, 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 248 se presentan los esquemas para su ejecución según las indicaciones. Además, se enfatiza en el control de aguas. Las aguas provenientes de esta obra pueden ser vertidas en la quebrada NN3.

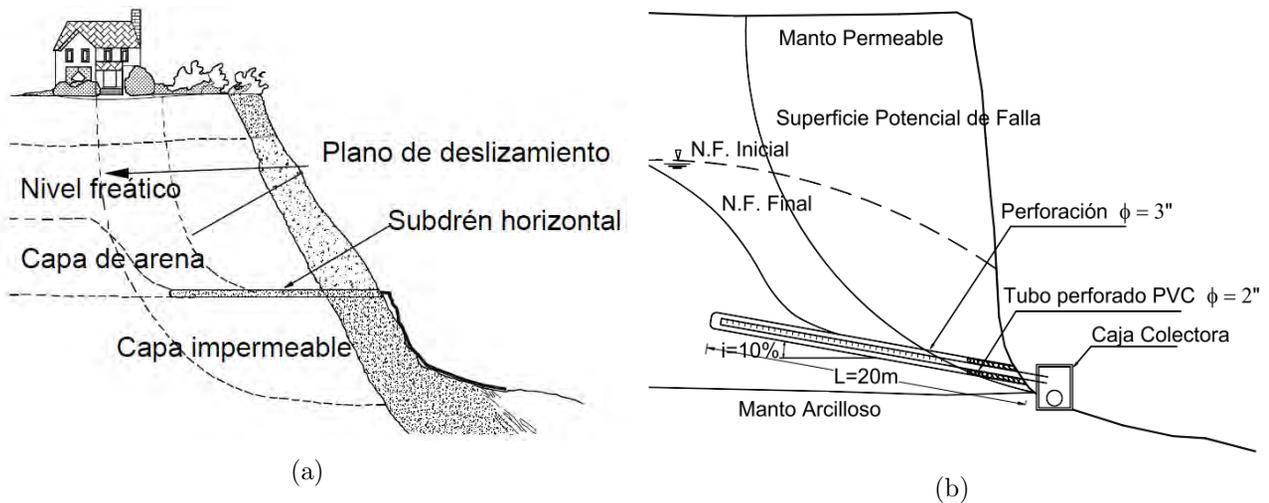


Figura 248: Esquema uso de subdrenes horizontales (Suárez, 2009)

### 17.2.12. Obra N°19 - *Box culvert*

Como propuesta para la mitigación de inundaciones en el antiguo ETCR La Fila, se propone darle mayor capacidad hidráulica a la obra de paso ubicada en las vías internas y que actualmente generaría desbordamiento ante la creciente asociada a un período de retorno de 500 años. En la Figura 202 y en la Figura 203 de la sección 13, puede observarse el punto en el cual ocurre una bifurcación producto de la insuficiencia hidráulica de las condiciones actuales.

En la Tabla 113 se presentan algunos parámetros y las dimensiones hidráulicas del diseño del *box culvert* planteado como medida. La Figura 249 presenta un esquema con las dimensiones del *box culvert*.

- Tener presente la profundidad de socavación en el diseño del *box culvert*.
- Es necesario realizar mantenimiento constante al *box culvert*, removiendo basuras y sedimentos que allí se acumulen.
- Revisar la posibilidad de una estructura de protección del canal a la salida del *box culvert*, pues en éste se acelera el flujo y provocará erosión.
- La cota de fondo del *box culvert* deberá coincidir con la cota de fondo del canal, a menos que en un diseño de detalle se especifique lo contrario.
- Es importante mantener la pendiente longitudinal del terreno en la obra de paso.

Tabla 113: Parámetros *box culvert* proyectado

Tipo de la obra	<i>Box culvert</i> rectangular
Material	Concreto
Coefficiente de rugosidad	0,013
Ancho interno (m)	2
Gálibo (m)	1
Pendiente mínima (m/m)	0,03
Caudal de diseño (m <sup>3</sup> /s)	2,1
Coefficiente de descarga entrada	0,8
Profundidad de flujo	0,72
Área mojada (m <sup>2</sup> )	1,44
Perímetro mojado (m)	3,44
Radio hidráulico (m)	0,42
Velocidad media de flujo (m/s)	2,00
Caudal resultante (m <sup>3</sup> /s)	2,30
Suficiente	Sí

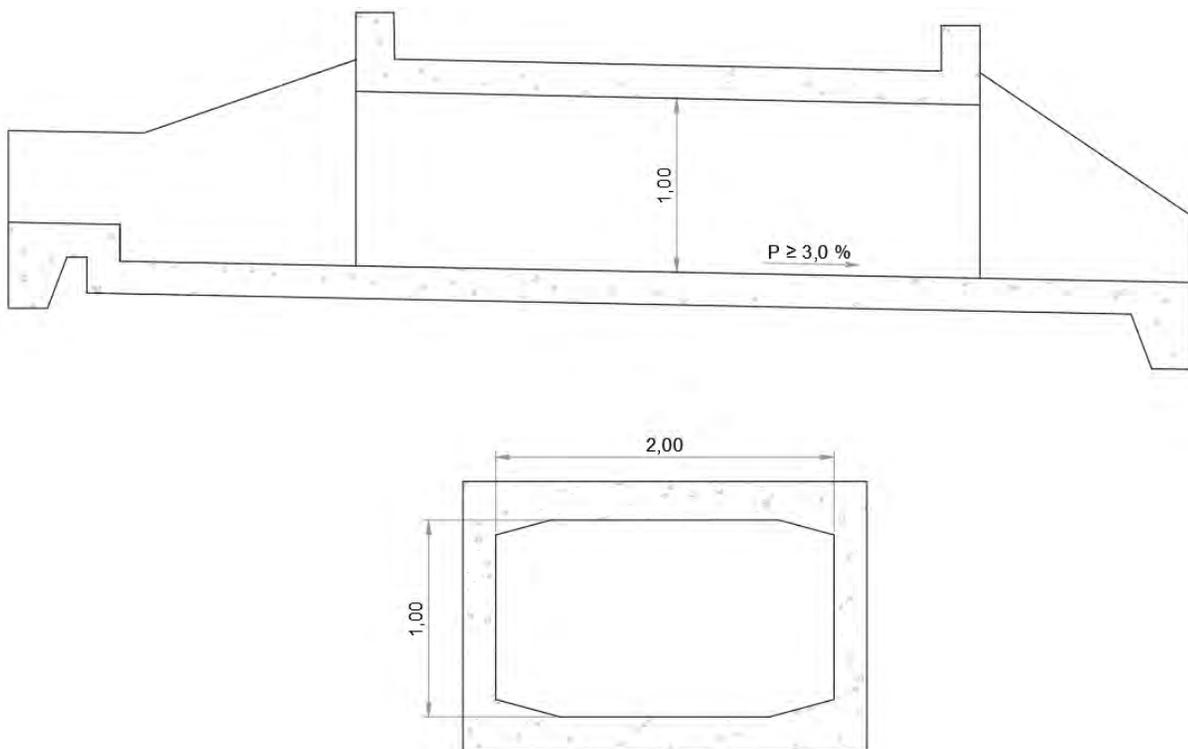


Figura 249: Esquema de sección transversal y frontal de *box culvert* para el antiguo ETCR La Fila

- Es importante considerar las aletas de la obra para que esta capte todo el flujo de entrada.

# 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, E., y Loigge, B. (2018). Spatially distributed rainfall information and its potential for regional landslide early warning systems. *Natural Hazards*.
- Geopolimeros SAS. (2018). *Soluciones control de erosión*. Descargado 2020-12-16, de <https://www.catalogo.geopolimerossas.com/2018/05/03/soluciones-control-de-erosion/>
- Glade, T., Crozier, M., y Smith, P. (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.
- Prodalam. (2020). *Geomantas para control de erosión*. Descargado 2020-12-16, de <https://www3.prodalam.cl/geomantas-para-control-de-erosion/>
- Reichenbach, P., Cardinali, M., De Vita, P., y Guzzetti, F. (1998). Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the tiber river basin (central italy). *Environmental Geology*, 35(2), 146–159.
- Revista occidental. (2015). *Cvc realizo obra de bioingeniería en el municipio de la cumbre*. Descargado 2020-12-14, de <https://revistaoccidental.wordpress.com/2015/11/20/cvc-realizo-obra-de-bioingenieria-en-el-municipio-de-la-cumbre/>
- 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>
- Tensar International corporation. (2012). *Sistemas para el control de la erosión*.
- Thiebes, B., y Glade, T. (2016). Landslide early warning systems—fundamental concepts and innovative applications. *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*.
- Universidad Católica de Colombia. (2016). *Manual de obras de bioingeniería en zonas de laderas con procesos de remoción de masa para altitudes superiores a 3.000 m.s.n.m.*

## Parte V

# Esquema de aproximación espacial

## Capítulo 18

# 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 tiene en cuenta características propias cada antiguo ETCR. Para ello se realiza una propuesta de ubicación de cada infraestructura futura en un ejercicio que busca verificar las posibilidades de desarrollo que serán evaluadas en detalle en las fases siguientes a este convenio.

### 18.1. 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 250 se observa las restricciones marcadas en el capítulo de viabilidad normativa que son puntos importantes al momento de establecer una propuesta de ocupación del espacio. Estas restricciones están marcadas por suelos de protección. En la imagen también se marca 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 251 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.

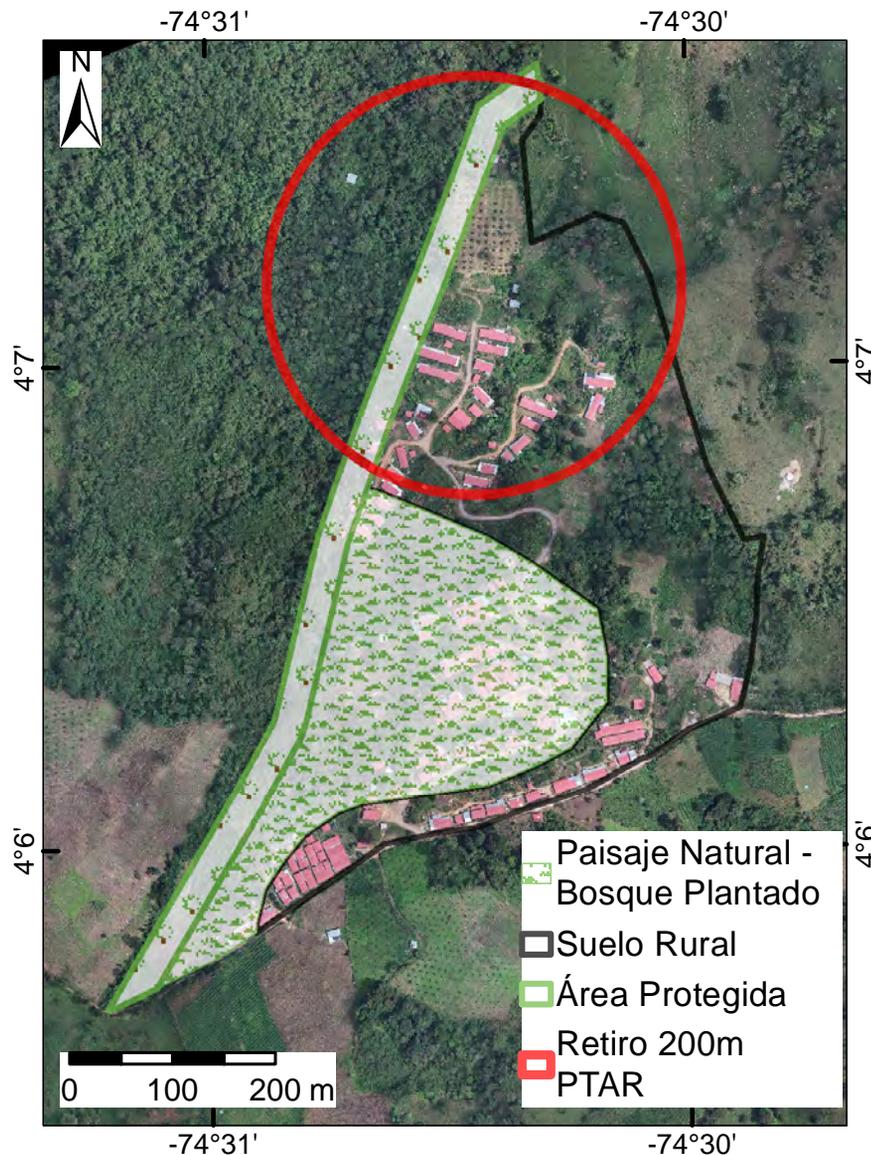


Figura 250: Restricciones normativas

Con el cruce de estos elementos normativos y de amenaza se cuenta con un área neta urbanizable de  $114645,93 \text{ m}^2$ , en la cual se realizará la propuesta para los 177 predios, vías y posibles usos asociados. Se realiza un análisis de infraestructuras como instituciones educativas tal como se presenta en la Tabla 114, que muestra la cantidad de instituciones educativas en relación con la distancia en que se encuentran del antiguo ETCR. Adicionalmente se muestran las unidades productivas que, en conjunto con la ARN, se lograron identificar. Es importante mencionar que las unidades productivas requieren infraestructuras que no están siendo tenidas en cuenta en este documento y deberán ser

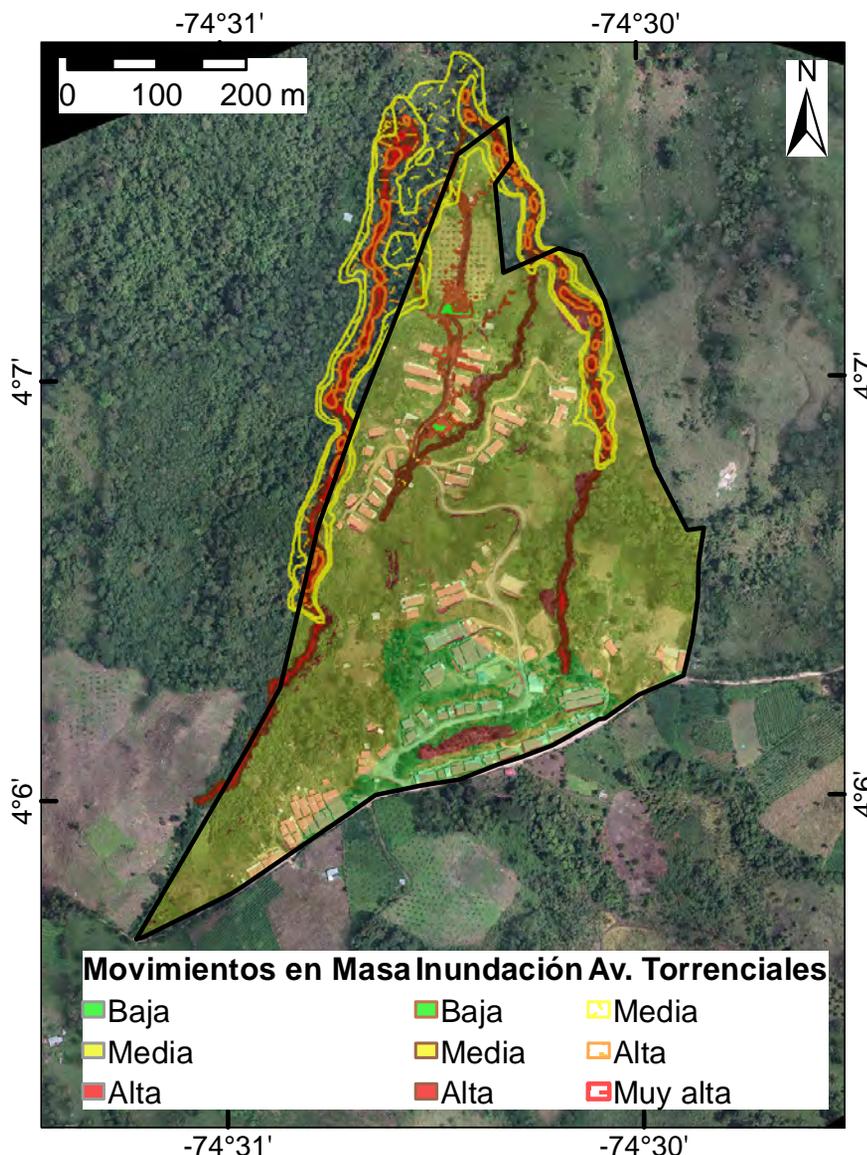


Figura 251: Evaluación de amenazas

estudiadas con mayor detalle en fases siguientes.

Para La Fila se cuenta con 146 instituciones que varían entre educación preescolar, primaria y secundaria en una radio de 20 km, de las cuales, 3 se encuentran a una distancia menor a 2.5 km. Las actividades productivas principales giran en torno a la ganadería, confecciones y comercio local.

Tras los análisis mencionados, se presenta a continuación los elementos propuestos para el antiguo ETCR como equipamientos, vías y viviendas.

Tabla 114: influencia de instituciones educativas y unidades productivas

ETCR		La Fila
<i>Área total</i>		228542,72
<i>Número de viviendas</i>		177
<i>Población</i>		238
<i>Instituciones educativas</i>	0 - 1 km	0
	1 - 2,5 km	3
	2,5 - 10 km	41
	10 - 20 km	98
	<b>TOTAL</b>	<b>142</b>
<i>Unidades productivas</i>	Comercio y salón de juegos. Comercio de leche y carne. Confección	
<i>Equipamientos existentes</i>	Aula colectiva, Biblioteca, Restaurante, Bodega, Hostal, Salón de juegos	

### 18.1.1. 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 cuenta 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 cuenta 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 La Fila, teniendo en cuenta una población de 238 habitantes, el centro comunitario tiene  $666,4 \text{ m}^2$

### 18.1.2. 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.

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
- Alberca
- 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 "l $\bar{z}$  en  $\bar{u}$ ", que permite diferentes implantaciones en los predios de acuerdo con las necesidades particulares que deben ser evaluadas y ajustadas en etapas de diseño (Figura 252). (<https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/fichas-tecnicas-vivienda-nueva-vivienda-rural.pdf>).

### 18.1.3. 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.

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 253 se muestra el planteamiento espacial de las vías y senderos peatonales para el antiguo ETCR con 1084 m de vía vehicular y 917 m de senderos peatonales.

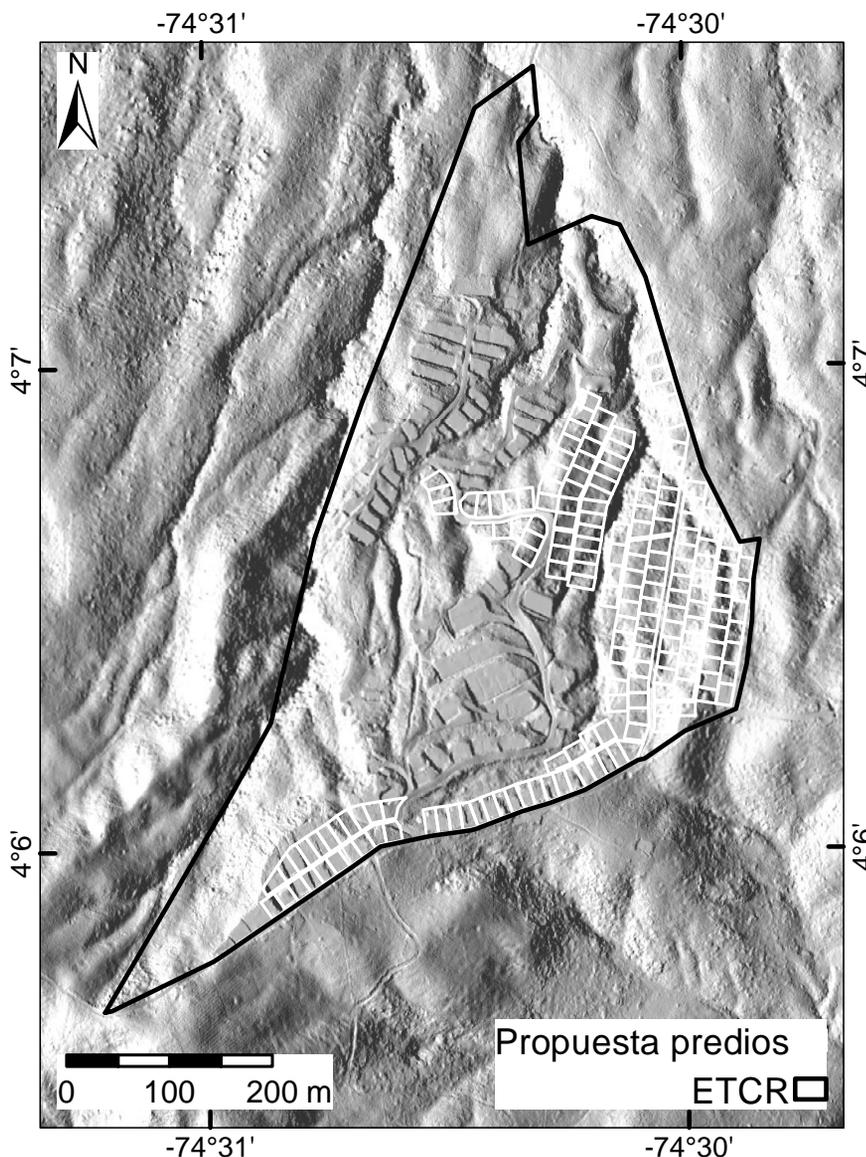


Figura 252: Propuesta de predios

## 18.2. Borrador norma urbanística objeto de ajuste en Icononzo

Con base en el análisis de normativa urbanística del PBOT vigente del Municipio de Icononzo, 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.

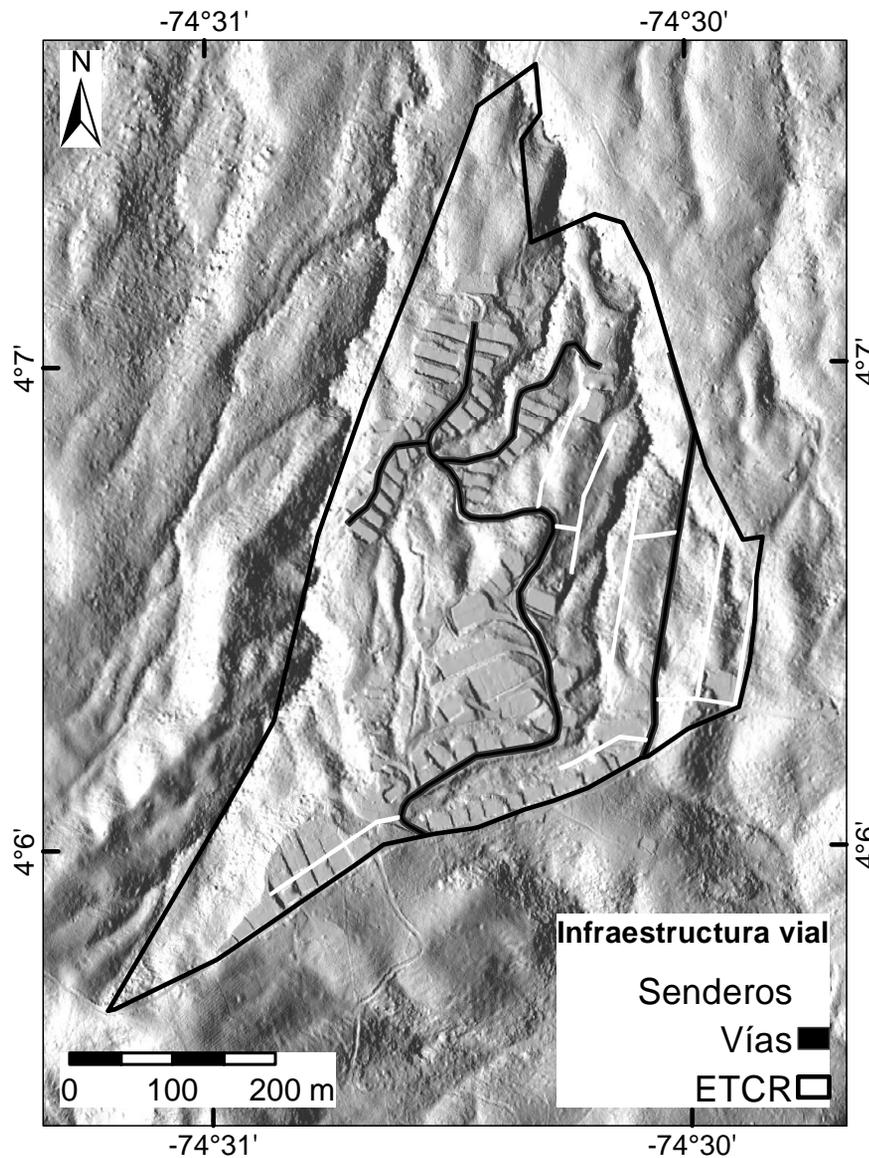


Figura 253: Prepuesta infraestructura vial

### 18.2.1. Componente general

#### Titulo XX. Clases de suelos

##### Artículo 1°. Suelo Suburbano

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 Icononzo participará de la plusvalía causada por los siguientes hechos generadores:

1. 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.

## **18.2.2. 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 al artículo 51 del Acuerdo 03 de 2007 la Tabla 115:

Tabla 115: 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. Prácticas 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 116: Uso con áreas mínimas y máximas

Usos	Área mínima	Área Máxima
Uso Principal	60 %	100 %
Uso Complementario	0 %	30 %
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 117:

Tabla 117: Densidad habitacional

Uso del suelo	Densidad
Usos en suelo suburbano	8,2 viv/ha

**Artículo 11°. Índice de Ocupación en suelos suburbanos**

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**

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 118 las siguientes cesiones urbanísticas:

Tabla 118: Cesiones urbanísticas

CÓDIGO	COBERTURA BOSCOSA	ESPACIO PÚBLICO (suelo)	EQUIPAMIENTOS (construcción)	
			VIVIENDA m2	OTROS USOS %
xxxxx	15 % del área neta del lote resultantes de proceso de parcelación	5 % Área bruta del lote objeto de parcelación	20 m por cada destinación de vivienda	1 % del área total construida

## Titulo XX. Normas de parcelación

### Artículo 14°. Área mínima de lote en suelos suburbanos

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  $300 m^2$ .

### Artículo 15°. Frente mínimo de lote

El frente mínimo en suelos suburbanos se establece en 20m.

### 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

Se establece un área mínima de vivienda de  $45 m^2$ .

Artículo 19°. Área de local El área mínima de local comercial se establece en  $24 m^2$ . y un máximo de  $250 m^2$ .

### Artículo 20°. Retiros de construcción a linderos.

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. 1. Existencia física de Techo, muros en obra gris, puertas y ventanas sobre fachadas, patios y vacíos.
2. 2. Existencia de cocina, salón múltiple y 2 habitaciones.
3. 3. Baño con equipos sanitarios y ducha con enchape en piso y muros.
4. 4. Existencia de puerta en Baños.
5. 5. Existencia de poyo y pozuelo en cocina.
6. 6. Existencia de lavadero en zona de ropas.

### **18.3. 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.

#### **18.3.1. Equipamientos**

En la Tabla 119 se presentan los valores totales calculados para los equipamientos de cancha y centro comunitario, el primero de ellos ya se viene desarro-

llando 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 119: Resumen costo equipamientos

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR TOTAL
<i>EQUIPAMIENTOS</i>		\$ 1.553.279.274
Cancha múltiple en césped	1	\$ 518.496.849
Centro comunitario	666,4	\$ 1.034.782.426

### 18.3.2. Viviendas

En la Tabla 120 se presentan los valores totales de cada tipología presentada por la Dirección de Vivienda Rural, para las 177 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.

Tabla 120: Resumen de costo para viviendas por tipología

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR TOTAL
<i>VIVIENDAS</i>		
VISRT1	177	\$ 11.990.767.115
VISRL1	177	\$ 12.050.541.104
VISRA1	177	\$ 11.875.481.971
VISRC1	177	\$ 12.013.099.507
VISRC2	177	\$ 11.237.904.738
VISRU1	177	\$ 11.941.589.708

### 18.3.3. Infraestructura Vial

En la Tabla 121 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 INVIAAS en Colombia. (<https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/hechos-de-transparencia/analisis-de-precio-unitarios>)

Es de resaltar que .....

Tabla 121: Resumen costo infraestructura vial

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR TOTAL
<i>VÍAS</i>		\$ 1.109.555.234
Vías de tercer orden	1,084	\$ 930.796.327
Caminos peatonales	917	\$ 178.758.907

#### 18.3.4. 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 122.

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 La Fila se presentan 19 obras de mitigación que varían entre canales y drenes horizontales para el manejo de aguas, gaviones y trinchos para el control de laderas y revegetación para la protección del suelo.

Para ampliar información técnica sobre dichas obras, referirse al capítulo de Obras de mitigación.

#### 18.3.5. 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 123 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 122: Resumen obra de mitigación

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR TOTAL
OBRAS DE MITIGACIÓN		\$ 421.749.936
Obra 1: conformación de taludes	1	\$ 21.451.224
Obra 2: modificación de geometrías	1	\$ 25.047.296
Obra 3: modificación de geometrías	1	\$ 7.032.652
Obra 4: modificación de geometrías	1	\$ 123.331.439
Obra 5: modificación de geometrías	1	\$ 32.979.177
Obra 6: estructural	1	\$ 40.871.160
Obra 7: manejo de aguas	1	\$ 2.807.312
Obra 8: manejo de aguas	1	\$ 12.831.067
Obra 9: revegetación	1	\$ 13.400.677
Obra 10: manejo de aguas	1	\$ 11.606.900
Obra 11: manejo de aguas	1	\$ 41.244.721
Obra 12: manejo de aguas	1	\$ 6.014.855
Obra 13: manejo de aguas	1	\$ 7.585.935
Obra 14: manejo de aguas	1	\$ 14.573.135
Obra 15: manejo de aguas	1	\$ 12.648.381
Obra 16: revegetalización	1	\$ 6.700.339
Obra 17: revegetalización	1	\$ 6.700.339
Obra 18: manejo de aguas	1	\$ 16.809.973
Obra 19: manejo de aguas	1	\$ 18.113.355

Tabla 123: Resumen costo tratamiento de agua

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR TOTAL
PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS		\$ 2.164.350.034
Potable	1	\$ 1.181.225.661
Residual	1	\$ 983.124.373

#### 18.4. 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 254, 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: 17.299.475.583 correspondiente a la tipología VISRL1.

Tipologías	Viviendas	Vías	Equipamientos	Obras de mitigación	Plantas de tratamiento	TOTALES
<b>VISRT1</b>	\$ 11.990.767.115	\$ 1.109.555.234	\$ 1.553.279.274	\$ 421.749.936	\$ 2.164.350.034	\$ 17.239.701.594
<b>VISRL1</b>	\$ 12.050.541.104	\$ 1.109.555.234	\$ 1.553.279.274	\$ 421.749.936	\$ 2.164.350.034	\$ 17.299.475.583
<b>VISRA1</b>	\$ 11.875.481.971	\$ 1.109.555.234	\$ 1.553.279.274	\$ 421.749.936	\$ 2.164.350.034	\$ 17.124.416.450
<b>VISRC1</b>	\$ 12.013.099.507	\$ 1.109.555.234	\$ 1.553.279.274	\$ 421.749.936	\$ 2.164.350.034	\$ 17.262.033.986
<b>VISRC2</b>	\$ 11.237.904.738	\$ 1.109.555.234	\$ 1.553.279.274	\$ 421.749.936	\$ 2.164.350.034	\$ 16.486.839.216
<b>VISRU1</b>	\$ 11.941.589.708	\$ 1.109.555.234	\$ 1.553.279.274	\$ 421.749.936	\$ 2.164.350.034	\$ 17.190.524.187

Figura 254: Costo total

**Parte VI**  
**Concepto**

## Capítulo 19

# Concepto técnico 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 de La Fila, 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 La Fila 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 más 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 -74,522944 X y 4,104723 (sistema Magna Bogotá 950540,1350 X y 945665,8 y) de 8,3 l/s, con valores mínimos históricos de 3,0 l/s, abastece las demandas estimadas del ETCR para 319 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 La Fila cuenta con un área total de 22,8 ha; de las cuales 1,44 ha presentan amenaza alta por movimientos en masa y/o inundación y/o avenidas torrenciales. 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 81,8 % 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 11,9 % 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 La Fila **ES VIABLE** para un desarrollo urbanístico que se ajuste a los lineamientos brindados en el presente estudio técnico de soporte.

## Parte VII

### Anexo

# Capítulo 20

## 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:

### **20.1. 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 estándares 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

### **20.2. 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

### **20.3. Anexo 3 Documentos normativos**

Durante el estudio de la viabilidad normativa de cada uno de los antiguos ETCR se compilo y elaboro información que sirvió como insumo para los análisis presentados en el documento, los cuales se encuentran en esta anexo.

### **20.4. 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 capitulo II y se anexan para mayor detalle de la siguiente manera:

1. Alternativas
2. Cálculos - especificaciones

3. Planos

4. proyectos de agua

### **20.5. 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.

### **20.6. 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 comprension y lectura.