

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 LLANO GRANDE

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 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 Díaz Uruena, Estudiante auxiliar Ingeniería ambiental

Índice general

1. Generalidades	33
1.1. Objeto	33
1.2. Alcances	34
1.2.1. Localización del área de estudio	34
1.3. Evolución de la ocupación territorial.	36
1.3.1. Contexto geológico y geomorfológico	36
1.4. Condiciones de lluvia del área de estudio	42
1.4.1. Variación temporal	44
1.4.1.1. Datos estaciones pluviométricas IDEAM	44
1.4.1.2. Datos estimados por satélite CHIRPS	48
1.4.2. Correlación IDEAM-CHIRPS	50
1.4.3. Variación espacial	51
1.5. Información secundaria	54
1.5.1. Estudios previos	54
1.5.2. Información cartográfica	56
 I Viabilidad Jurídica	 63
2. Viabilidad Jurídica	64
2.1. Antecedentes	65
2.2. Viabilización del antiguo ETCR Llano Grande a la luz de la norma de ordenamiento territorial vigente	68
2.2.1. Vigencias POT	68
2.2.2. Procedimiento de revisión y ajuste de los POT	71
2.2.2.1. Revisión Ordinaria del POT	71
2.2.2.2. Modificación excepcional de norma urbanística	77

2.2.2.3.	Creación de un marco normativo excepcional para proyectos de vivienda y usos complementarios para el proceso de reincorporación	81
2.2.2.4.	Posturas jurídicas frente a la revisión de los POT	83
2.2.3.	Caracterización y análisis general de la norma territorial del municipio de Dabeiba	88
2.2.3.1.	Análisis de tenencia antiguo ETCR Llano Grande	88
2.2.3.2.	Caracterización general físico espacial	91
2.3.	Conclusiones	107

II Viabilidad Sanitaria 122

3. Viabilidad Sanitaria 123

3.1.	Variables del diseño	123
3.2.	Normatividad	124
3.3.	Proyección poblacional	125
3.3.1.	Modelo de proyección de población	126
3.4.	Caudales de diseño	129
3.4.1.	Dotación de agua	129
3.4.2.	Caudal de diseño sistema de tratamiento de agua potable	131
3.4.3.	Caudal de diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales	132
3.4.4.	Oferta hídrica	132
3.4.4.1.	Descripción de la fuente hídrica	132
3.4.4.2.	Cálculo de la oferta	132
3.4.4.3.	Cálculo de caudal ambiental	141
3.4.4.4.	Disponibilidad hídrica	142
3.5.	Caracterización y calidad de agua a tratar	143
3.5.1.	Calidad de agua para consumo humano	143
3.5.2.	Calidad de vertimiento para aguas residuales	144
3.6.	Tratamiento de aguas crudas	145
3.7.	Tratamiento de aguas residuales	145
3.7.1.	Proceso aerobio	146
3.7.2.	Proceso anaerobio	146
3.7.3.	Proceso anóxico	147

4. Metodología de Alternativas	149
4.1. Tipos de tratamiento de aguas	150
4.2. Alternativas de la PTAP	151
4.2.1. Alternativa 1. (Coagulación+ floculación+ sedimentación+ filtración, desinfección)	151
4.2.2. Alternativa 2 (Filtración directa + desinfección)	152
4.2.3. Alternativa 3. (Tanque de agua cruda + micro y ultra-filtración + desinfección)	153
4.3. Alternativas de la PTAR	153
4.3.1. Alternativa 1. (Lodos Activados + Sedimentación)	153
4.3.2. Alternativa 2 (UASB + FAFA+ Sedimentación)	154
4.3.3. Alternativa 3. (Laguna facultativa y/o anaerobia)	155
4.4. Matriz de decisión	156
4.4.1. Aplicabilidad del proceso	157
4.4.2. Generación de Residuos	157
4.4.3. Aceptación por parte de la Comunidad	157
4.4.4. Flexibilidad de la tecnología para adecuación a cumplimiento de cambio normativo	157
4.4.5. Vida útil	158
4.4.6. Requerimientos de Área	158
4.4.7. Costos	158
4.4.8. Diseño y Construcción	158
4.4.9. Operación	158
4.4.10. Entorno e Impacto al Medio Ambiente	159
4.5. Operación matriz de decisión	159
4.5.1. Ponderación de Rubros	160
4.5.2. Características cuantificables de Alternativas	161
4.5.3. Análisis de Información existente	164
4.5.4. Calificaciones Matriz PTAP	165
4.5.5. Calificaciones Matriz PTAR	169
4.6. Matriz de decisión y calificaciones	174
4.6.1. Matriz de decisión PTAP	175
4.6.2. Matriz de decisión PTAR	176
4.7. Resultados y conclusiones	177

5. Captación y Aducción de agua cruda para tratamiento	179
5.1. Captación	179
5.2. Sistema de pretratamiento - Desarenador	181
5.3. Conducción de agua cruda	183
6. Planta de Tratamiento de Agua Potable	185
6.1. Diagrama de flujo de procesos.	187
6.2. Tren de tratamiento de aguas	188
6.2.1. Dosificación de productos químicos para clarificación y desinfección	188
6.2.1.1. Cálculo de la dosificación de coagulante	188
6.2.1.2. Ajuste de pH y floculación	189
6.2.1.3. Cálculo dosificación de desinfectante	190
6.2.2. Floculador-Sedimentador de Manto de Lodos (FSML) . .	190
6.2.3. Sistema de filtración	192
6.2.4. Tanque de contacto	194
6.2.5. Tanque de almacenamiento	196
6.3. Tren de tratamiento de lodos	197
6.3.1. Pozo de lodos	198
6.3.2. Espesador hidráulico	198
6.3.3. Lechos de secado	198
6.4. Componentes generales	200
6.4.1. Caseta de operación	201
6.4.2. Vías y andenes dentro de la planta	202
7. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales	204
7.1. Diagrama de flujo de procesos	206
7.2. Tren de tratamiento de aguas	207
7.2.1. Canal de entrada y pretratamiento	207
7.2.2. Tanque de igualación de caudales	208
7.2.3. Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente Mezcla Completa (UASB)	209
7.2.4. Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA)	211
7.2.5. Sedimentador secundario de alta tasa	212
7.2.6. Canal de salida y aforo	213
7.2.7. Estructura de descarga	214
7.3. Tren de tratamiento de lodos	214

7.3.1.	Deshidratación de lodos	214
7.3.2.	Disposición de biosólidos	215
7.4.	Componentes generales	216
7.4.1.	Caseta de operación	216
7.4.2.	Vías y andenes dentro de la planta	217
7.4.3.	Alternativas de ubicación PTAR	218

III Viabilidad por Amenaza

<i>Estudios Básicos de Amenaza</i>	221

8. Amenaza por Movimientos en masa 222

8.1.	Marco normativo de gestión del riesgo	223
8.2.	Estudios previos	225
8.3.	Definición del área de influencia	226
8.4.	Elaboración del inventario de movimientos en masa	227
8.4.1.	Catálogo histórico de eventos	228
8.4.1.1.	Procesos morfodinámicos	230
8.5.	Evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa	233
8.5.1.	Unidad de análisis y área mínima cartografiable	234
8.5.2.	Variables predictoras	235
8.5.2.1.	Inclinación de la ladera (IL)	235
8.5.2.2.	Pendiente (S)	235
8.5.2.3.	Relieve relativo (RR)	235
8.5.2.4.	Rugosidad (Rug)	236
8.5.2.5.	Índice de humedad topográfica (TWI)	236
8.5.2.6.	Índice de posición topográfica (TPI)	236
8.5.2.7.	Elevación relativa al cauce (EAS)	236
8.5.2.8.	Distancia al drenaje siguiendo la pendiente (DDS)	237
8.5.2.9.	Distancia a Fallas (DF)	237
8.5.2.10.	Geología Superficial (Gs)	237
8.5.2.11.	Evolución de las coberturas (Ec)	237
8.5.2.12.	Cinemático (Cin)	237
8.5.2.13.	Curvatura total (Cu)	237
8.5.3.	Selección de variables y estimación de pesos por AHP	238
8.5.4.	Descripción de variables y estimación de pesos de las clases	242
8.5.4.1.	Geología Superficial (Gs)	243

8.5.4.2.	Evolución de las coberturas (Ec)	257
8.5.4.3.	Curvatura (Cu)	265
8.5.4.4.	Relieve relativo (RR)	268
8.5.4.5.	Pendiente (S)	268
8.5.4.6.	Distancia al drenaje según la pendiente (DDS)	271
8.5.4.7.	Distancia a las fallas (DF)	271
8.5.4.8.	Cinemático (Cin)	275
8.5.5.	Mapa de susceptibilidad con AHP y peso de la evidencia	276
8.5.6.	Modelo Regresión Logística	277
8.5.7.	Evaluación de los modelos de susceptibilidad	278
8.6.	Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia	282
8.6.1.	SHALSTAB	282
8.7.	Amenaza por movimientos en masa detonados por sismo	287
8.7.1.	Sismicidad histórica	287
8.7.1.1.	Sismo del 26 de septiembre de 1970 (Mw=6,6)	288
8.7.1.2.	Sismo del 30 de agosto de 1977 (Mw=6,5)	289
8.7.1.3.	Sismos del 17-18 de octubre de 1992 (Mw=6,6 - Mw=7,1)	289
8.7.2.	Metodología - Bloque deslizante de Newmark	289
8.8.	Mapas de amenaza	294
9.	Amenaza por Inundaciones	299
9.1.	Estudios previos	299
9.2.	Definición del área de influencia para la evaluación de la amenaza por Inundación	300
9.3.	Catalogo histórico de eventos	301
9.4.	Estimación de caudales máximos	302
9.4.1.	Tiempos de concentración	302
9.4.2.	Curvas Intensidad - Duración - Frecuencia	302
9.4.3.	Distribución temporal de la tormenta de diseño	303
9.4.4.	Estimación de la infiltración	305
9.4.5.	Hidrógrafa unitaria	307
9.5.	Zonificación de manchas de inundación a escala de cuenca	308
10.	Amenaza por Avenidas Torrenciales	314
10.1.	Definición del área de influencia	314
10.2.	Catalogo histórico de eventos torrenciales	315

10.3. Evaluación de la susceptibilidad por avenidas torrenciales a nivel de cuenca	317
10.3.1. Análisis morfométrico	317
10.3.1.1. Parámetros relacionados a la red de drenaje . .	317
10.3.1.2. Parámetros relacionados a la geometría y forma de la cuenca.	319
10.3.1.3. Parámetros relacionados a la textura de la cuenca.	321
10.3.1.4. Parámetros relacionados al relieve de la cuenca	323
10.3.2. Aporte de sedimentos	337
10.4. Zonificación de manchas de avenidas torrenciales a escala de cuenca	339
11. Definición de áreas con condición de amenaza o riesgo	345
11.1. Ocupación Territorial	345
11.1.1. Áreas con condición de amenaza (ACA)	346
11.1.2. Áreas con condición de riesgo (ACR)	346
11.2. Medidas no estructurales	349
11.2.1. Recomendaciones específicas	351
IV Viabilidad por Amenaza	
<i>Estudios de Detalle</i>	352
12. Amenaza por Movimientos en masa	353
12.1. Información cartográfica de detalle	354
12.2. Geomorfología local	355
12.3. Procesos morfodinámicos	360
12.4. Geología para ingeniería	362
12.4.1. Exploración y toma de muestras	363
12.4.2. Unidades geológicas superficiales	366
12.4.3. Prospección sísmica	373
12.4.4. Análisis de laboratorio	375
12.4.5. Zonas geotécnicas homogéneas	378
12.5. TRIGRS	383
12.5.1. Amenaza por movimientos en masa superficiales	383
12.5.2. Modelo FOSM (First Order Second Moment)	388
12.6. Scoops3D	390
12.6.1. Modelo de estabilidad - Método Bishop simplificado. . .	393

12.6.2. Análisis sísmico	395
12.6.3. Resultados.	397
12.7. Mapa de amenaza por movimiento en masa	400
12.8. Análisis de estabilidad para sectores críticos	404
12.8.1. Análisis de estabilidad para el corte C1	406
12.8.2. Análisis de estabilidad para el corte C2	406
12.8.3. Análisis de estabilidad para el corte C3	408
12.8.4. Análisis de estabilidad para el corte C4	409
12.8.5. Análisis de estabilidad para el corte C5	410
12.8.6. Análisis de estabilidad para el corte C6	412
12.8.7. Análisis de estabilidad para el corte C7	414
12.8.8. Análisis de estabilidad para el corte C8	416
12.8.9. Análisis de estabilidad para el corte C9	416
12.8.10. Análisis de estabilidad para el corte C10	419
12.8.11. Análisis de estabilidad para el corte C11	420
12.8.12. Mapa de amenaza por movimiento en masa	422
13. Amenaza por Inundaciones	427
13.1. Descripción del modelo hidrodinámico bidimensional	428
13.1.1. Caudales de simulación	429
13.1.2. Rugosidad	430
13.1.3. Condiciones de borde y condiciones iniciales	431
13.2. Categorización de amenaza por inundación	431
13.3. Resultados	432
13.4. Amenaza final por inundaciones	434
14. Amenaza por Avenidas Torrenciales	438
14.1. Metodologías	438
14.1.1. Simulación hidrológica con IBER	438
14.1.2. Simulación fluido-dinámica con <i>r.avaflow</i>	439
14.2. Resultados	441
14.2.1. Simulación hidrológica con IBER	441
14.2.2. Simulación fluido-dinámica con <i>r.avaflow</i>	442
14.3. Amenaza final por avenidas torrenciales	444
15. Vulnerabilidad	448
15.1. Vulnerabilidad social	448

15.1.1. Fragilidades socioeconómicas	451
15.1.2. Capacidades sociales	454
15.2. Vulnerabilidad física	457
15.2.1. Vulnerabilidad por movimientos en masa	457
15.2.1.1. Fragilidad	458
15.2.1.2. Intensidad	463
15.2.1.3. Mapa de vulnerabilidad por movimientos en masa	466
15.2.2. Vulnerabilidad por Inundaciones	466
15.2.2.1. Curvas de daño	467
15.2.2.2. Mapa de vulnerabilidad por Inundación	470
15.2.3. Vulnerabilidad por avenidas torrenciales	470
16. Riesgo	475
16.1. Riesgo actual	476
16.2. Riesgo prospectivo	478
16.3. Esquema de aproximación espacial	478
16.3.1. Prototipo vivienda rural	481
16.3.1.1. Evaluación de riesgo prospectivo	481
16.4. Riesgo socioeconómico	486
16.4.1. Matriz de riesgo	489
17. Medidas de mitigación y remediación	491
17.1. Medidas no estructurales	491
17.1.1. Umbrales de lluvia	493
17.1.1.1. Umbrales de lluvia estaciones IDEAM escala dia- ria	494
17.1.1.2. Umbrales de lluvia de satélite CHIRPS escala mensual	494
17.1.1.3. Umbrales de lluvia como sistemas de alerta tem- prana (SAT)	495
17.1.2. Estrategias para el aprovechamiento del suelo	496
17.2. Medidas estructurales	497
17.2.1. Obra N°1 - <i>Box culvert</i>	498
17.2.2. Obra N°2 - Canal #1	500
17.2.3. Obra N°3 - Canal #2	501
17.2.4. Obra N°4 - Muro flexible (Gaviones)	501
17.2.5. Obra N°5, 6 y 7 - Trinchos	503

17.2.6. Obra N°8 Subdrenes horizontales	503
V Esquema de aproximación espacial	506
18. Esquema de aproximación espacial	507
18.1. Planteamiento espacial	507
18.1.1. Equipamientos	510
18.1.2. Viviendas	511
18.1.3. Infraestructura vial	511
18.2. Borrador norma urbanística objeto de ajuste en Dabeiba	512
18.2.1. Componente general	513
18.2.2. Componente rural	514
18.3. Presupuesto	519
18.3.1. Equipamientos	520
18.4. Viviendas	520
18.4.1. Infraestructura Vial	520
18.4.2. Obras de Mitigación	521
18.5. Tratamiento de agua	521
18.6. Resumen presupuestal	522
VI Concepto	523
19. Concepto técnico de viabilidad	524
VII Anexo	526
20. Anexos	527
20.1. Anexo 1 Levantamiento topográfico	527
20.2. Anexo 2 Estudios subsuelo	527
20.3. Anexo 3 Documentos normativos	528
20.4. Anexo 4 Cálculos y estudios Agua	528
20.5. Anexo 5 Cálculos presupuesto de vivienda	529
20.6. Anexo 6 Estándares Cartográficos	529

Índice de figuras

1.	Ubicación antiguos ETCR a nivel nacional.	32
2.	Localización del antiguo ETCR Llano Grande.	35
3.	Evolución de la ocupación.	37
4.	Mapa Geológico 1:100.000 predio Llano Grande	40
5.	Mapa Geomorfológico 1:100.000 predio Llano Grande	41
6.	Panorámica de Ladera Estructural (Sle)	42
7.	Panorámica de contrapendiente (Slcp)	43
8.	Panorámica de Espolón moderado de longitud larga	43
9.	Panorámica de Terraza de Acumulación (Fta)	44
10.	Mapa litoestructural asociado a la cuenca del antiguo ETCR Llano Grande	45
11.	Estaciones IDEAM cercanas al antiguo ETCR-Llano Grande . .	46
12.	Precipitación diaria multianual estación Fuemia	47
13.	Precipitación mensual multianual para la estación Fuemia, a)Valores medios, máximos y mínimos. b)Precipitación media mensual mul- tianual para meses con ocurrencia del El Niño y La Niña	48
14.	Precipitación anual multianual de la estación Fuemia, donde, las barras color rojo representan la ocurrencia de El Niño, el color azul La Niña y el gris periodos Neutros.	49
15.	Precipitación diaria multianual estimación CHIRPS a nivel de cuenca	50
16.	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	51
17.	Precipitación anual multianual CHIRPS a nivel de cuenca, don- de, las barras color rojo representan la ocurrencia de El Niño, el color azul La Niña y el gris periodos Neutros.	51

18.	Correlación de la información dada por los pluviómetros del IDEAM y CHIRPS en la estación FUEMIA a escala a) Diaria, b) Mensual y c) Anual.	52
19.	Variación espacial de la a) Precipitación diaria media (PDMed) y b) Precipitación diaria máxima (PDMax)	53
20.	Variación espacial de la a) Precipitación mensual media (PDMed), b) Precipitación mensual máxima (PDMax) y c) Precipitación mensual mínima (PDMin)	53
21.	Imagen satelital representativa de la misión Sentinel 1 del año 2020.	58
22.	Imagen satelital representativa de la misión Sentinel 2 del año 2020.	59
23.	Imagen satelital representativa de la misión Landsat 8 del año 2017.	60
24.	Imagen satelital representativa de la misión Landsat 5 del año 1987.	61
25.	Proceso de consolidación de los antiguos ETCR. Fuente Convenio 752 de 2020	67
26.	Cronograma aproximado de ejecución para la Revisión ordinaria del PBOT	76
27.	Cronograma aproximado de ejecución para un escenario de modificación excepcional de norma urbanística	79
28.	Cronograma aproximado para un escenario Ley	82
29.	Clasificación Suelo antiguo ETCR Llano Grande (Municipio de Dabeiba. Fuente: Cartografía PBOT - Municipio de Dabeiba)	93
30.	Usos del Suelo en el antiguo ETCR Llano Grande. Fuente: Cartografía PBOT - Municipio de Dabeiba	95
31.	Reserva Forestal del Pacífico en el SIAC	101
32.	Reserva Forestal del Pacífico en el SIAC SIG-OT IGAC	101
33.	Ubicación del predio El Llano en el Mapa 03 PBOT	103
34.	: Imprecisión cartográfica Mapa 03 PBOT vs Fuentes oficiales Sistema de Información Geográfico (SIG-OT IGAC y el SIAC)	104
35.	Área No Urbanizable antiguo ETCR Llano Grande. Fuente: Cartografía PBOT - Municipio de Dabeiba)	108
36.	Centro Poblado de referencia Chimiadó (Dabeiba)	118

37.	(a) Área No Urbanizable antiguo ETCR Llano Grande bajo insu- mos PBOT. (b) Áreas urbanizables y no urbanizables proyecta- das según ajuste cartográfico. Fuente: Cartografía PBOT - Muni- cipio de Dabeiba Cartografía Básica Digital Integrada. República de Colombia. Escala 1:25.000. IGAC	120
38.	Cuenca del sitio de captación	133
39.	Sitio de captación para antiguo ETCR Llano Grande	134
40.	Cuenca e información hidroclimática empleada para la calibra- ción del modelo	135
41.	Esquema de funcionamiento del modelo	136
42.	CDC entre la serie estimada y la observada	140
43.	Serie de caudal estimada y observada	140
44.	Serie de caudal sintética microcuenca abastecedora	140
45.	Curva de duración de caudales - microcuenca abastecedora	141
46.	Ciclo anual de caudales en año medio para microcuenca abaste- cedora	142
47.	Balance de masas.	150
48.	Tren tratamiento PTAP Alternativa 1.	152
49.	Tren tratamiento PTAP Alternativa 2.	152
50.	Tren tratamiento PTAP Alternativa 3.	153
51.	Tren tratamiento PTAR Alternativa 1.	154
52.	Tren tratamiento PTAR Alternativa 2.	155
53.	Tren tratamiento PTAR Alternativa 3.	156
54.	Calidad de la fuente.	165
55.	Matriz de decisión PTAP.	175
56.	Matriz de decisión PTAR.	176
57.	Esquema 3D de la PTAP.	186
58.	Diagrama de flujo de procesos en la PTAP.	187
59.	Esquema Floculador Sedimentador de Manto de Lodos (FSML). . . .	191
60.	Esquema del filtro en arena.	193
61.	Esquema Tanque de contacto.	195
62.	Esquema Tanques de almacenamiento.	196
63.	Esquema del espesador hidráulico.	199
64.	Esquema de los lechos de secado.	200

65.	Estratificación de la estructura del lecho de secado (medidas en metros).	200
66.	Vista en planta de la distribución propuesta en la PTAP.	201
67.	Esquema 3D de la PTAR.	205
68.	Diagrama de flujo de procesos en la PTAR.	206
69.	Canal de entrada y pretratamiento de las aguas residuales.	207
70.	Esquema del reactor UASB.	210
71.	Esquema del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA).	211
72.	Modelo del Sedimentador Secundario con paneles de tasa alta.	212
73.	Esquema de los lechos de secado.	215
74.	Estratificación de la estructura del lecho de secado (medidas en metros).	216
75.	Vista en planta de la distribución propuesta en la PTAR.	217
76.	Alternativas de ubicación adicional para PTAR	219
77.	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.	226
78.	Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa PBOT Dabeiba, 2010	227
79.	Área de influencia para la evaluación de la amenaza en el antiguo ETCR Llano Grande	228
80.	Distribución espacial de movimientos en masa en el municipio de Dabeiba registrados en el catálogo SIMMA	230
81.	Clasificación utilizada en la identificación de procesos morfo-dinámicos	231
82.	Inventario procesos morfodinámicos Llano Grande - cuenca quebrada Chimiadó	232
83.	Histograma de frecuencia de Kernel con la densidad de probabilidad para las variables continuas analizadas	239
84.	Matriz de correlación	240
85.	Mapa de unidades geológicas superficiales en el área de influencia para la evaluación de amenaza en el antiguo ETCR Llano Grande	244
86.	Unidad de basaltos. a) Afloramiento costado izquierdo de la vía hacia la vereda Llano Grande (horizonte I). b) Basalto en muestra de mano	245

87.	Unidad de diabasas. a) Afloramiento de roca fresca a alterada con algunas fisuras (horizonte I). b) Diabasa en muestra de mano. c) Pátinas de óxido en muestra de diabasa	245
88.	Perfil de meteorización unidad de basaltos y diabasas: Horizonte II	246
89.	Perfil de meteorización unidad de basaltos y diabasas: Horizonte III	246
90.	Perfil de meteorización unidad de basaltos y diabasas: Horizonte VI	247
91.	Unidad de basaltos y diabasas afectados dinámicamente, generando milonitas o filonitas. a) Afloramiento de roca altamente fisible. b) Muestra de mano de milonita apartir de la unidad de basaltos y diabasas	247
92.	Miembro Urrao afectado por metamorfismo dinámico, generando milonitas o filonitas. a) Afloramiento de roca con plegamientos. b) Afloramiento de roca con planos de foliación bien definidos. c)Afloramiento de roca con planos de foliación menos desarrollados (horizonte I). d) Muestra de mano de milonita de coloración gris oscura a partir de rocas sedimentarias del Miembro Urrao .	248
93.	Perfil de meteorización del Miembro Urrao: Horizonte II	249
94.	Perfil de meteorización Miembro Urrao: Horizonte III, IV y V .	250
95.	Perfil de meteorización Miembro Urrao: Horizonte IV	251
96.	Muestra de mano de chert negro con costras y venillas calcáreas (Miembro Nutibara), en el costado izquierdo de la quebrada Chimiadó	252
97.	Material que conforma los depósitos aluviales de la quebrada Chimiadó	253
98.	Depósitos aluviotorrenciales en el área de influencia para la evaluación de amenaza en el antiguo ETCR Llano Grande. a) Depósito aluviotorrencial con presencia de bloques de hasta 1m de diámetro en la parte sur de la quebrada Chimiadó. b) Composición de algunos de los bloques: chert con bandas calcáreas. c)Depósito aluviotorrencial hacia el norte de la quebrada Chimiadó. d) Depósito aluviotorrencial de la quebrada Llanogrande	254

99. Vista de la parte final del depósito de vertiente sobre el cual se ubica el antiguo ETCR Llano Grande	254
100. Depósito de vertiente. a) Depósito de vertiente sobre el que está asentado el antiguo ETCR Llano Grande (color amarillo), y cañón formado por la quebrada Llanogrande (color blanco). b) Cañón de la quebrada Llanogrande. c) Vista del depósito de vertiente hacia el norte	255
101. Perfil del material que conforma el depósito de vertiente	256
102. Algunos depósitos de vertiente vistos desde la vía que conduce de Dabeiba al antiguo ETCR Llano Grande.	256
103. Coberturas actuales.	258
104. Índice vegetación normalizado Llano grande año 1991-2020 . . .	259
105. Representación estadística NDVI Llano Grande	260
106. Tonalidades resultantes de combinación NDVI multitemporal .	260
107. Representación multitemporal NDVI	262
108. Evolución de las coberturas multitemporal.	263
109. Evolución de las coberturas.	264
110. Cambio coberturas año 1987-2020	266
111. (a) Mapa de Curvatura Perfil y (b) Mapa de Curvatura Plana, antiguo ETCR La Llano Grande	268
112. Mapa de Curvatura antiguo Llano Grande	269
113. Gráfica de clases de <i>landforms</i> por su porcentaje en área del ETCR Llano Grande	269
114. Mapa de índice de relieve relativo para el antiguo ETCR Llano Grande	270
115. Mapa de índice de pendiente para el antiguo ETCR Llano Grande	272
116. Mapa de índice de distancia al drenaje para el antiguo ETCR Llano Grande	273
117. Mapa índice de distancia a las fallas del antiguo ETCR Llano Grande	274
118. Clasificación cinemática de laderas.	276
119. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa utilizando AHP y WoE.	278
120. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa utilizando RL	279
121. Area bajo la curva para el método AHP y peso de la evidencia .	280
122. Area bajo la curva para el método regresión logística	280

123. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa en el antiguo ETCR Llano Grande.	281
124. Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 10 años.	285
125. Susceptibilidad por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 100 años.	286
126. Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 500 años.	287
127. Registro sismicidad histórica municipio de Dabeiba	288
128. Sismicidad histórica municipio de Dabeiba	288
129. Bloque deslizante método de Newmark	290
130. Amenaza por movimientos en masa detonados por sismo. a) Escenario #1 condición seca. b) Escenario #2 condición saturada.	293
131. Mapa de amenaza por movimiento en masa para el antiguo ETCR Llano Grande	295
132. Cuencas Llanogrande y Chimiadó	301
133. Ubicación de Estaciones pluviográficas	304
134. Curvas IDF: (a) Cuenca Llanogrande y (b) Cuenca Chimiadó	304
135. Diagrama de Huff para grupo de tormentas II	305
136. Histograma de precipitación de diseño Cuenca Llanogrande Tr=100 años	305
137. Descripción HAND, fuente: (Rennó y cols., 2008)	309
138. HAND cuenca Llanogrande	309
139. HAND cuenca Chimiadó	310
140. Ejemplo - calado cuenca Llanogrande	310
141. Zonificación de amenaza por inundación	311
142. Diagrama conceptual de la evaluación de la amenaza por avenidas torrenciales.	315
143. Áreas de influencia para la evaluación de avenidas torrenciales. A) Cuenca A B) Cuenca B	316
144. Cambio de forma de la curva hipsométrica con la edad del río. Fuente: Elaboración propia	326
145. Curva hipsométrica e histograma altimétrico de la Q. Llanogrande.	329
146. Perfil longitudinal de la Q. Llanogrande.	329
147. Curva hipsométrica e histograma altimétrico de la Q. Chimiadó.	330

148. Perfil longitudinal de la Q. Chimiadó.	330
149. Umbrales de Wilford, Sakals, Innes, Sidle, y Bergerud (2004) aplicados para el antiguo ETCR Llano Grande.	334
150. Comparación de variables con Rh para el antiguo ETCR Llano Grande.	336
151. Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia corres- pondiente al periodo de retorno de 10 años.	337
152. Susceptibilidad por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 100 años.	338
153. Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia corres- pondiente al periodo de retorno de 500 años.	339
154. Zonificación de amenaza por avenidas torrenciales	341
155. Ocupación territorial	347
156. Levantamiento Construcciones	348
157. Zonas en condición de amenaza para el predio del antiguo ETCR.	349
158. Zonas en condición de riesgo para el predio del antiguo ETCR. .	350
159. Resultado del trabajo realizado con LIDAR, Elaborado con el software <i>Quick Terrain Reader</i>	355
160. Ortofotografía del antiguo ETCR Llano Grande	356
161. Modelo digital de terreno(DTM) del antiguo ETCR Llano Grande	356
162. Esquema de caracterización y nomenclatura de componentes geo- morfológicas	357
163. Mapa geomorfológico de detalle del antiguo ETCR Llano Gran- de.	358
164. Vista de componentes geomorfológicas en el antiguo ETCR Llano grande: Superficie de explanación (Sep), plano anegadizo (Pa), montículo muy bajo con cima convexa plana (Momxp), ladera abrupta corta rectilínea lisa (Lacrl)	360
165. Vista de componentes geomorfológicas en el antiguo ETCR Llano Grande: Plano anegadizo (Pa), ladera moderada muy corta rec- tilínea lisa (Lmmrl), ladera abrupta corta rectilínea lisa (Lacrl) .	361
166. Vista de componentes geomorfológicas en el antiguo ETCR Llano Grande: Superficie de explanación (Sep), montículo muy bajo con cima convexa plana (Momxp), ladera abrupta corta rectilínea lisa (Lacrl))	362

167. Vista de componentes geomorfológicas en el antiguo ETCR Llano grande	362
168. Mapa de procesos morfodinámicos en el antiguo ETCR Llano grande.	363
169. Movimientos en masa en la ladera oeste del antiguo ETCR Llano grande	364
170. Procesos morfodinámicos hacia el sur del polígono del antiguo ETCR y en cercanías de la cancha de fútbol.	364
171. Exploración	365
172. Ilustraciones de apiques y perforaciones. (a) Apique con dimensiones $1x1x1,5m$ con toma de muestra inalterada a $0,5m$ de profundidad y alterada a $1,5m$. (b) Perforaciones a $6m$ y $3m$ de profundidad con diámetro de $55mm$ con toma de muestra alterada o inalterada cada $50cm$	366
173. Mapa de unidades geológicas superficiales (UGS) en el antiguo ETCR Llano Grande. Aluvión (Al), depósito de vertiente (Dvert), saprolito de las litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao (SK2alu), suelo antrópico (Sa), suelo antrópico removido (Sar), suelo residual de las litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao (SrK2alu).	367
174. Depósito de vertiente (Dvert)	368
175. Tamaño de clastos y bloques que componen el depósito de vertiente (Dvert)	369
176. Suelo residual de las litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao (SrK2alu)	370
177. Saprolito de las litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao (SK2alu)	371
178. Suelo antrópico (Sa)	372
179. Suelo antrópico removido (Sar)	372
180. Esquema ensayo de refracción sísmica (ASTM, 2011)	373
181. Perfil 2D V_s línea 1	375
182. Perfil 2D V_s línea 2	376
183. Variabilidad en los límites de consistencia de la zona 1 mediante la Carta de plasticidad de Casagrande.	380
184. Variabilidad en los límites de consistencia de la zona 2 mediante la Carta de plasticidad de Casagrande.	381

185. Variabilidad en los límites de consistencia de la zona 3 mediante la Carta de plasticidad de Casagrande.	381
186. Variabilidad en los límites de consistencia de la zona 4 mediante la Carta de plasticidad de Casagrande.	382
187. Variabilidad en los límites de consistencia de la zona 5 mediante la Carta de plasticidad de Casagrande.	382
188. Variabilidad en los límites de consistencia de la zona 6 mediante la Carta de plasticidad de Casagrande.	383
189. Esquema metodológico de la evaluación de amenaza empleando TRIGRS como modelo de amenaza. Adaptado de van Westen, Castellanos, y Kuriakose (2008)	385
190. Condiciones hidrológicas en los estratos superficiales del suelo. Adaptado de Baum, Savage, Godt, y (U.S.) (2008)	386
191. Amenaza por movimientos en masa tipo planar- a) Escenario $T_r=10$ años parcialmente saturado	390
192. Amenaza por movimientos en masa tipo planar- Escenario $T_r=10$ años saturado	391
193. Amenaza por movimientos en masa tipo planar- Escenario $T_r=100$ años parcialmente saturado	391
194. Amenaza por movimientos en masa tipo planar- Escenario $T_r=100$ años saturado	392
195. a) Matriz de análisis Scoops3D (Reid, Christian, Brien, y Henderson, 2015). b) Capas de entrada	393
196. a) Diagrama 3D del análisis de estabilidad (Reid y cols., 2015). b) Diagrama de fuerzas sobre columna típica (Zhang y Wang, 2019)	395
197. Espectro elástico de aceleraciones en superficie, amortiguamiento del 5 % (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010) . .	396
198. Coeficiente de amplificación F_a del suelos para periodos cortos del espectro (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010)	397
199. Amenaza por movimientos en masa tipo circular	399
200. Amenaza por movimientos en masa tipo planar	400
201. Amenaza por movimientos en masa tipo circular	401
202. Ajuste heurístico	402
203. Amenaza por movimientos en masa	403

204. Mapa de las unidades de ladera y los cortes realizados para el antiguo ETCR Llano Grande.	405
205. Perfil del corte C4 en escenario más crítico (sismo circular) con disminución del nivel freático.	412
206. Perfil del corte C10 en escenario más crítico con disminución del nivel freático y anclajes.	420
207. Amenaza por movimientos en masa	423
208. Procedimiento para zonificación de amenaza por inundación . .	428
209. Corrientes antiguo ETCR Llano Grande	429
210. Categorización de amenaza por inundaciones	432
211. Distribución espacial del calado	433
212. Distribución espacial de la velocidad	433
213. Nivel de amenaza por inundación	434
214. Zonificación de amenaza por inundaciones ajustada geomorfológicamente.	435
215. Zonificación final de amenaza por inundaciones.	436
216. Zonificación de amenaza por avenida torrencial según el modelo hidrológico.	441
217. Simulación de la avenida torrencial de una fase con concentración de sólidos de 80 %.	442
218. Simulación de la avenida torrencial de una fase con concentración de sólidos de 60 %.	443
219. Simulación de la avenida torrencial de dos fases con concentración de sólidos de 40 %.	444
220. Zonificación de amenaza por avenidas torrenciales según modelo fluido-dinámico.	445
221. Zonificación final de amenaza por avenidas torrenciales.	446
222. Fragilidad social y económica antiguo antiguo antiguo ETCR . .	451
223. Capacidades antiguo ETCR	455
224. Planos módulos actuales de vivienda "Galpones" (Barreto, 2019). .	461
225. Estructuras encontradas en el antiguo ETCR. (a) Casa Modelo, (b) Bodega, (c) CAI, (d) CDI	462
226. Mapas de propagación por movimientos en masa en el antiguo ETCR de Llano Grande	464

227. Vulnerabilidad por movimientos en masa en el antiguo ETCR de Llano Grande	466
228. 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 O. Pinos J Timbe L (2020). . . .	468
229. Daño por inundación en el antiguo ETCR de Llano Grande . . .	471
230. Daño por avenidas torrenciales en el antiguo ETCR de Llano Grande.	472
231. Elementos actuales dentro del antiguo ETCR Llano Grande . .	477
232. Propuesta predios para viviendas	479
233. Viviendas guías	480
234. Prototipo vivienda rural proyectada	481
235. Mapas de propagación por movimientos en masa, escenario proyectado en el antiguo ETCR Llano Grande.	483
236. Vulnerabilidad por movimientos en masa de viviendas proyectadas en el antiguo ETCR Llano Grande	484
237. Daño por inundación en viviendas proyectadas en el antiguo ETCR de Llano Grande	485
238. Vulnerabilidad por avenidas torrenciales en viviendas proyectadas en el antiguo ETCR de Llano Grande	486
239. Viviendas proyectadas dentro del antiguo ETCR Llano Grande .	487
240.	489
241. Umbral de lluvia estación Fuemia IDEAM	495
242. Umbral de lluvia para satélite CHIRPS cuenca Chimiadó	496
243. Ubicación obras de mitigación y remediación	498
244. Esquema de sección transversal y frontal de <i>box culvert</i>	500
245. Canal #1(Suárez, 2001)	501
246. Sección canal revestido en suelo-cemento (Suárez, 2001)	501
247. Zona de obras N°2 y 3	502
248. Esquema muro flexible tipo gavión(Suárez, 2009)	502
249. Zona muro flexible	503
250. Esquema trinchos	504
251. Esquema uso de subdrenes horizontales (Suárez, 2009)	504
252. Restricciones normativas	508

253. Evaluación de amenazas	509
254. Propuesta de predios	512
255. Infraestructura vial propuesta	513
256. Costo total	522

Índice de tablas

1.	Estaciones pluviométricas del IDEAM cercanas al antiguo ETCR Llano Grande.	45
2.	Análisis de la propiedad al inmueble El Llano.	88
3.	Zonas de Reserva y Resoluciones de adopción	99
4.	Información SIAC	102
5.	Cálculo de aprovechamientos para predio El Llano.	105
6.	: Propuesta general de modificación e incorporación de artículos revisión PBOT.	111
7.	Densidad del centro poblado Chimiadó - Llano Grande	119
8.	Cálculo de densidad del Centro Poblado de referencia	119
9.	Proyección poblacional para los años establecidos en el periodo de diseño	128
10.	Usos del agua en viviendas.	130
11.	Volumen de subsistencia para el antiguo ETCR en estudio.	131
12.	Porcentaje de uso de agua de los proyectos productivos en el antiguo ETCR.	131
13.	Características de la fuente abastecedora proyectada antiguo ETCR Llano Grande	133
14.	Parámetros calibrados para el modelo de tanques	139
15.	Caudal ambiental microcuenca abastecedora	142
16.	Disponibilidad hídrica año seco y año medio para la microcuenca	143
17.	Caracterización de agua cruda según el grado de polución de la fuente (de Desarrollo Economico, 2000).	143
18.	Composición típica agua residual doméstica (Metcalf, Eddy, y Tchobanoglous, 1979).	144
19.	Ponderación de factores según criterios	161

20.	Cálculos alternativas PTAP	161
21.	Cálculos alternativas PTAR	162
22.	Composición típica agua residual doméstica	164
23.	Calificaciones de PTAP	165
24.	Calificaciones de PTAR	170
25.	Procesos de remoción de parámetros del agua cruda.	188
26.	Dosificación de coagulante.	189
27.	Dosificación desinfectante en la PTAP.	190
28.	Dimensiones del FSML.	192
29.	Dimensiones del filtro propuesto.	194
30.	Dimensiones del tanque de contacto.	195
31.	Dimensiones del tanque de almacenamiento.	196
32.	Tiempo de vaciado del tanque.	197
33.	Concentración de parámetros en el agua de salida de la planta. .	214
34.	Procesos morfodinámicos presentes en la cuenca de la quebrada Chimiadó	232
35.	Escala de importancia relativa. modificada de Saaty 1980 . . .	241
36.	Matriz de calificación AHP	241
37.	Pesos de las variables seleccionadas con el peso asignado para el antiguo ETCR Llano Grande	242
38.	Unidades geológicas presentes en el área de influencia para la evaluación de amenaza en el antiguo ETCR Llano Grande con pesos asignados	257
39.	Evolucion de las coberturas	265
40.	Rangos de las geoformas de curvatura	267
41.	Clases de geoformas de curvatura con sus respectivas áreas de ocupación en la zona de estudio y el peso asignado para la eva- luación de la susceptibilidad.	267
42.	Categorías de la variable Relieve Relativo.	271
43.	Categorías de la variable Pendiente.	271
44.	Índice distancia al drenaje según la pendiente.	272
45.	Tabla Índice de distancia a las fallas para el antiguo ETCR Llano Grande	274

46.	Clasificación cinemática de laderas. A: aspecto (0° - 360°), S: pendiente (0° - 90°), α : dirección del buzamiento (0° - 360°) y θ : buzamiento (0° - 90°). Modificado de Meentemeyer y Moody (2000).	275
47.	Susceptibilidad por movimientos en masa del antiguo ETCR Llano Grande.	282
48.	Parámetros geotécnicos para las unidades geológicas superficiales.	284
49.	Escenarios de lluvia establecidos para periodos de retorno (Tr) de 10, 100 y 500 años.	285
50.	Parámetros geotécnicos para las unidades geológicas superficiales.	292
51.	Expresiones para calcular el tiempo de concentración	303
52.	Tiempos de concentración	303
53.	Estimación del número de curva de la Cuenca Llanogrande	306
54.	Estimación del número de curva de la Cuenca Chimiadó	307
55.	Parámetros de pérdidas por infiltración	307
56.	Caudales máximos para diferentes tiempos de retorno de la cuenca Llanogrande	308
57.	Caudales máximos para diferentes tiempos de retorno de la cuenca Chimiadó	308
58.	Características de la cuenca de acuerdo con el valor Ff	320
59.	Características de la cuenca de acuerdo con el valor de Cc.	320
60.	Características de la cuenca de acuerdo con el valor Fs	321
61.	Características de la cuenca de acuerdo con el valor Dd	322
62.	Características de la cuenca de acuerdo con el valor Lg	323
63.	Distribución del numero de robustez.	324
64.	Limites de clases para procesos hidrogeomorfológicos relacionados con el indice de Melton (Wilford y cols., 2004).	325
65.	Parámetros morfométricos de la cuenca utilizados para la evaluación de torrencialidad	327
66.	Índices morfométricos para la evaluación de la torrencialidad de las cuencas del antiguo ETCR Llano Grande.	328
67.	Cálculo de caudal total para avenidas torrenciales	340
68.	Leyenda del mapa geomorfológico de detalle del antiguo ETCR Llano Grande.	359
69.	Clasificación perfiles del suelo a partir de Tabla A.2.4.4 NSR-10 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010)	374

70.	Distribución ensayos de laboratorio	376
71.	Recopilación de parámetros obtenidos mediante ensayos de laboratorio	378
72.	Parámetros geotécnicos para las unidades geológicas superficiales	383
73.	Parámetros hidráulicos empleados en la condición parcialmente saturada para las zonas geotécnicas homogéneas.	387
74.	Intensidades de Lluvia	388
75.	Valores medios y porcentaje de variación para el modelo FOSM (Assis, Espósito, Gardoni, Silva, y Maia, 2012)	389
76.	Parámetros geotécnicos para análisis en Scoops3D.	394
77.	Porcentaje de área de FS por escenario evaluado	398
78.	Porcentaje de mapa de amenaza por movimientos en masa	402
79.	Resultados de Slide para C1 y escenario más critico	407
80.	Resultados de Slide para C2 y escenario más critico	408
81.	Resultados de Slide para C3 y escenario más critico	409
82.	Resultados de Slide para C4 y escenario más critico con sismo y sin sismo.	411
83.	Resultados de Slide para C5 y escenario más critico con sismo y sin sismo.	413
84.	Resultados de Slide para C6 y escenario más critico con sismo y sin sismo.	414
85.	Resultados de Slide para C7 y escenarios más critico	415
86.	Resultados de Slide para C8 y escenario más critico	417
87.	Resultados de Slide para C9 y escenarios más critico	418
88.	Resultados de Slide para C10 y escenario más critico	419
89.	Resultados de Slide para C11 y escenario más critico	422
90.	Caudales de simulación - inundaciones	430
91.	Valores de referencia para coeficiente de rugosidad de Manning .	431
92.	Parametrización del modelo	440
93.	Esquema elementos para establecer la vulnerabilidad	452
94.	Escala de valoración	453
95.	Escala de valoración	456
96.	Factores de fragilidad por tipología de estructuras	459
97.	Factor de fragilidad por altura de la edificación	459
98.	Factores de fragilidad por estado de conservación de la edificación	460

99. Factor de fragilidad por edad de la edificación	460
100. Vida útil en función del tipo de edificación	460
101. Factores de fragilidad de las estructuras.	462
102. Presión límite o de falla, según tipo de estructuras. Fuente:(SGC, 2015)	465
103. Parámetro de intensidad por presión del impacto (I_{f-pre}). Fuente:(SGC, 2015)	465
104. Parámetro de intensidad según la profundidad del deslizamiento y la altura de las edificaciones. Fuente:SGC (2015)	465
105. 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.	468
106. Categoría y tipos de material para diferentes elementos de construcción	469
107. Factores en la implementación de la metodología para las estructuras antiguo ETCR Llano Grande.	470
108. Probabilidad espacial de la amenaza por movimientos en masa .	476
109. Pérdidas Esperadas Anuales (PEA) del escenario actual de algunas viviendas expuestas en el antiguo ETCR Llano Grande . . .	477
110. Factores de fragilidad de las estructuras.	482
111. Pérdidas Esperadas Anuales (PEA) del escenario proyectado de algunas viviendas expuestas en el antiguo ETCR Llano Grande	483
112.	488
113. Áreas aprovechamiento del suelo	497
114. Parámetros <i>box culvert</i> proyectado	499
115. Add caption	510
116. uso del suelo	517
117. Densidad habitacional	517
118. Cesiones urbaníticas	518
119. Resumen costo equipamientos	520
120. Resumen de costo para viviendas por tipología	520
121. Resumen costo infraestructura vial	521
122. Resumen obra de mitigación	522
123. Resumen costo tratamiento de agua	522

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 antiguos Espacios Territoriales de Capacitación y Reincorporación (ETCR), los cuales son administrados por la Agencia para la Reincorporación y Normalización (ARN). Los antiguos 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 antiguos Espacios finalmente conformados y 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 cinco (5) de los 24 antiguos ETCR que permitiera su desarrollo dentro del territorio, en la Figura 1 se ubican los 24 antiguos ETCR a nivel nacional resaltando los antiguos ETCR incluidos dentro del presente estudio. Para cada uno de ellos se consideraran 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 Llano Grande, localizado en el departamento de Antioquia. El presente informe contiene, de acuerdo con la minuta del contrato, la compilación y análisis normativo referente y necesario para el desarrollo de proyectos de vivienda en los antiguos ETCR; La evaluación del recurso hídrico para el abastecimiento y el diseño de una Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) y Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR); el estudio de viabilidad de amenaza en los fenómenos de movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en escala 1:25.000 y 1:2.000 y finaliza con la elaboración de un presupuesto estimado de ejecución del proyecto de vivienda y uso complementarios.



Figura 1: Ubicación antiguos ETCR a nivel nacional.

Capítulo 1

Generalidades

1.1. Objeto

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

Para lograr dicho objeto se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Avanzar técnicamente para el otorgamiento de soluciones de vivienda para las personas que se encuentren en proceso de reincorporación y sus familias que habitan los 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 alcance de los estudios apunta a la viabilidad en términos jurídicos, de amenaza por fenómenos naturales y disponibilidad de recurso hídrico de los (5) cinco antiguos ETCR seleccionados. El presente documento corresponde a los resultados del antiguo ETCR Llano Grande.

Para establecer dicha viabilidad se elaboraron 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 evalúa la viabilidad de la disponibilidad de agua potable y vertimiento de aguas negras, 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 la implementación metodológica son diferentes. Este ajuste a las particularidades en cada antiguos espacio territorial se concretó a medida que se avanzó en el trabajo en campo de la mano de los actores locales.

1.2.1. Localización del área de estudio

El antiguo ETCR Llano Grande (Figura 2), se localiza en el municipio de Dabeiba del departamento de Antioquia. Limita con los municipios de Mutatá e Ituango (Antioquia) al Norte, al Este con Pequé y Uramita (Antioquia), al Sur con Frontino y Murindó (Antioquia) y al Oeste con Murindó (Antioquia) y Carmen del Darién (Chocó).

En este territorio habita un importante número de indígenas Emberás Katios, quienes conservan su cultura, sus tradiciones y sus formas de vida cotidiana. Están distribuidos en 9 resguardos indígenas, que conservan su tradición, donde predominan las familias Domicó, Carupia, Cuñapa, y Bailarin.

El municipio de Dabeiba está dividido administrativamente en 4 corregimientos, Cruces, Camparrusia, Urama y Santa Teresa. Tiene 117 veredas entre las cuales figuran Tasidó, La Mesa, La Estrella, Florida, Armenia, Rioverde, Guadua-Lito, y San Agustín, el centro histórico indígena más grande de Co-

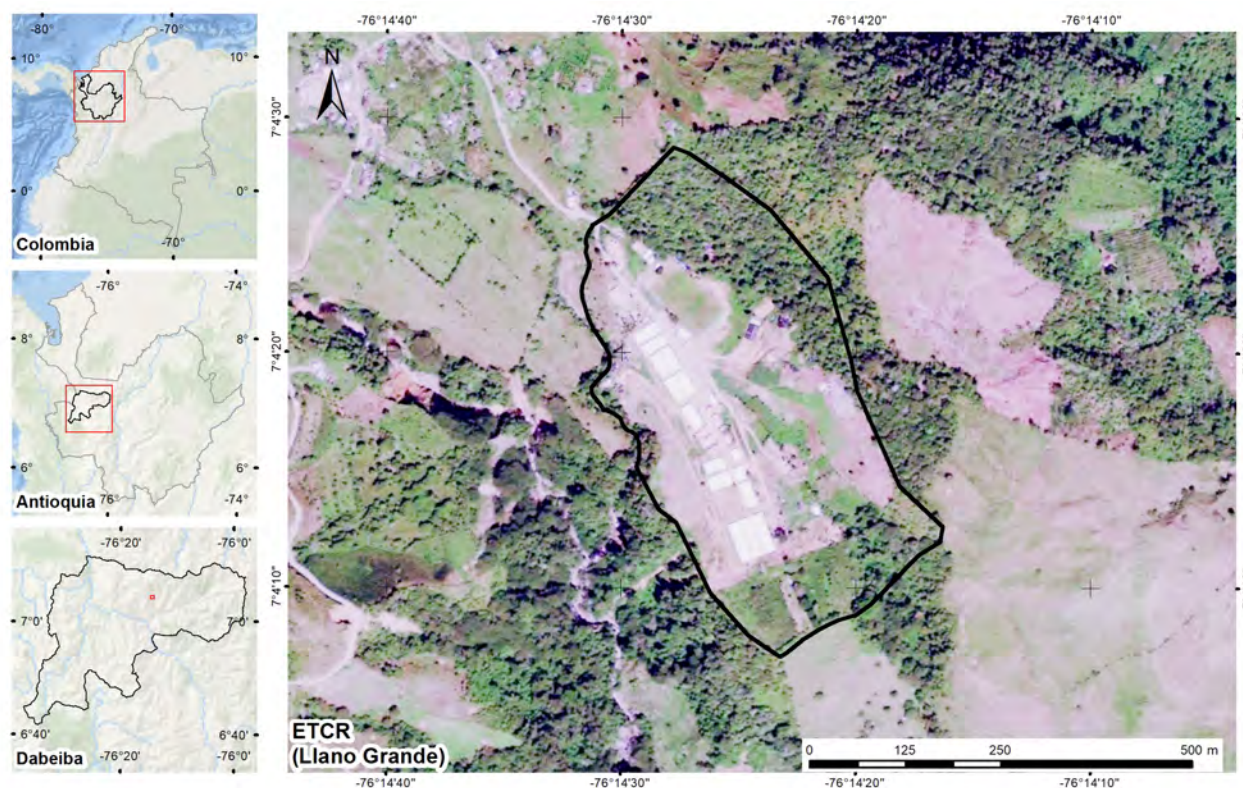


Figura 2: Localización del antiguo ETCR Llano Grande.

lombia.

La economía del municipio está basada en actividad agrícola con cultivos de café, frijol, tomate casero, caña de azúcar y maracuyá. Como insumo para la actividad industrial está la madera. Existe además como actividad económica la producción artesanal como collares, manillas y cestería por parte de las comunidades indígenas (CEPRI -UPB, 2017)

El antiguo ETCR Llano Grande está ubicado en la vereda que lleva su mismo nombre y es puerta de entrada a la subregión del Urabá Antioqueño. Para llegar a la vereda Llano Grande se toma la vía principal que viene de Medellín y llega al municipio de Dabeiba. Son aproximadamente 182 km, luego se toma la vía que lleva al cañón del Chimiadó.

De acuerdo con información suministrada por la ARN, a la vereda Llano Grande llegaron inicialmente 319 excombatientes de las FARC-EP. Para mayo del año 2019 solo se contabilizaban cerca de 140 personas incluido familiares que han ido a acompañarlos e hijos de parejas que han nacido durante el tiempo de reincorporación. En la actualidad, los desmovilizados se encuentran trabajando en proyectos productivos agrícolas como la siembra, recolección y venta de lulo,

maracuyá, frijol y maíz, los cuales son comercializados en la misma cabecera municipal y comunidades cercana.

1.3. Evolución de la ocupación territorial.

Contando con una visualización de cuenca y áreas aledañas al antiguo ETCR se realiza una revisión para considerar el desarrollo comunitario a través de las imágenes existentes de la zona que cuenten con la resolución para identificar la presencia de viviendas como medidor de la ocupación.

En la Figura 3 se puede apreciar la evolución de la ocupación en la cuenca desde el año 2016 hasta el presente. Este análisis se realiza en la plataforma *Google Earth Engine* a través del algoritmo *Random Forest* al realizar una clasificación supervisada de las imágenes satelitales de Sentinel 2 para los años 2020 y 2019 y Landsat 8 para los años 2017 y 2016.

En la cuenca no se encuentran construcciones representativas en las imágenes satelitales analizadas anteriores al año 2016. Solamente se encuentran unas pocas, dispersas y pequeñas al sur del área que representan tan solo 600 m^2 . A partir del año 2017 se observa la aparición de construcciones en lo que ahora constituye el predio del ECTR, consolidándose aún más en el año 2019. Adicionalmente en este año aumentan las construcciones dispersas al sur y centro de la cuenca, mientras que al norte no se encuentran construcciones. Para el año 2019 se estima un área urbana cercano a 92.000 m^2 . Finalmente, en el año 2020 se expanden más las construcciones en el área del predio y aumentan más las construcciones dispersas hasta llegar a más de 100.000 m^2 . Esto representa un alto crecimiento en la ocupación urbana que constituye un área 30 veces más extensa en 3 años. El norte conserva su cobertura boscosa a lo largo de los años por lo que no se encuentran construcciones.

1.3.1. Contexto geológico y geomorfológico

El predio Llano Grande se encuentra sobre la plancha geológica 114 Oriental-Dabeiba (INGEOMINAS, 2010), cerca a la unión triple de las placas Nazca, Caribe y Suramérica. Por lo que este sector está sometido a una amplia deformación y con una tectónica compleja que ha dado como resultado un mosaico de bloques tectónicos limitados por fallas, orientados en sentido regional N-S, los cuales adquirieron, en buena medida, la configuración actual durante la orogenia Andina (INGEOMINAS, 2010) (Figura 4).

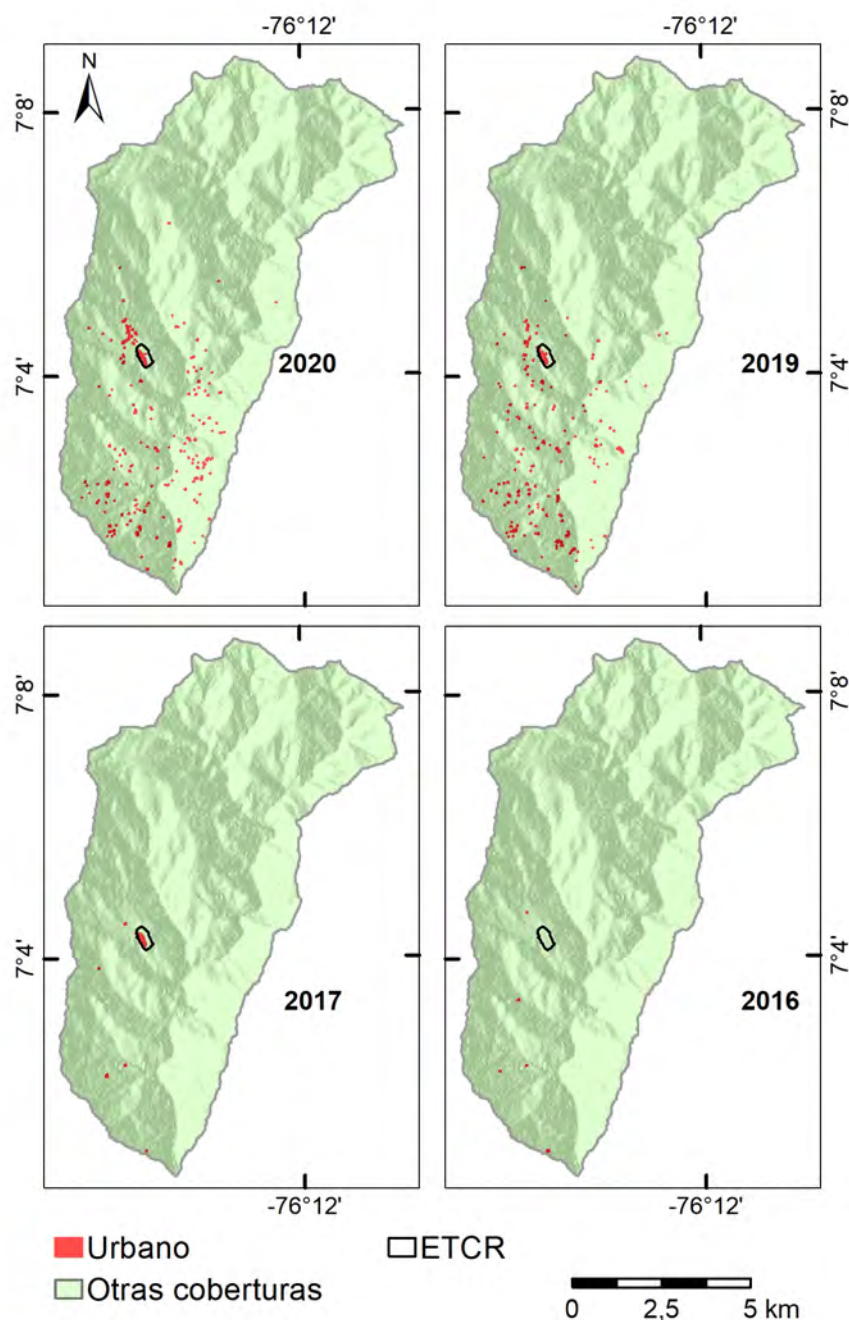


Figura 3: Evolución de la ocupación.

La geología la componen rocas ígneas, sedimentarias y rocas de falla. Las unidades geológicas principales corresponden al Complejo Cañasgordas (K2pmn), constituido por bloques tectónicos de diabasas y basaltos, paquetes de chert y calizas y bloques de lodolitas, limolitas y arenitas líticas y depósitos cuaternarios de vertiente, aluviales y terrazas (Figura 4) (INGEOMINAS, 2010). La

unidad diabasas y basaltos de la formación Barroso (JRK1du) está conformada por bloques lenticulares y algunos continuos que afloran al borde oriental de la cordillera Occidental al norte del Macizo de Tatamá y al occidente de la falla Cauca-Patía, limitados por fallas normales e inversas con adelgazamientos y engrosamientos locales. Las diabasas corresponden a derrames, diques y silos diabásicos correlacionados con las facies efusivas de la formación Barroso (INGEOMINAS, 2010). El Complejo Cañasgordas lo conforman Chert, Calizas y limolitas silíceas, como una unidad volcánica con intercalaciones sedimentarias que en la zona de estudio muestra colores negros a grises oscuros, en estratos delgados, de 3 a 10 cm de espesor, plano – paralelos, con intenso plegamiento y con un diaclasamiento perpendicular a los planos de estratificación. Esta formación presenta un escaso perfil de meteorización debido a su carácter silíceo y sólo forman un inceptisol (Suelo inmaduro desarrollado sobre roca), donde el horizonte A llega como máximo a tener 10 cm de espesor y el horizonte B, de color oscuro por aporte coluvial (resultado de erosión laminar en las partes más altas). Ambos horizontes contienen al menos 30 % de fragmentos de guijarros o gravas (INGEOMINAS, 2010).

En la formación Penderisco del miembro Nutibara (K2cn) se agrupan una serie de bloques tectónicos que afloran en la zona de estudio, los cuales corresponden a franjas irregulares de dirección norte-sur y ampliamente variables que oscilan entre decenas de metros y tres (3) km, conforman bloques tectónicos alargados, continuos y discontinuos, limitados por fallas normales e inversas, con adelgazamientos y engrosamientos locales, generalmente plegados que se intercalan con los bloques de diabasas y basaltos y menos frecuente con bloques de litoarenitas y lodolitas grises (INGEOMINAS, 2010).

En la zona se encuentran depósitos cuaternarios que están compuestos por depósitos aluviales (Q2al), que ocupan las llanuras de inundación de los cauces actuales; están conformados por material suelto como bloques y gravas de rocas volcánicas básicas, plutónicas y sedimentarias en diferentes proporciones en una matriz de material de arena y grava no consolidado. De los depósitos aluviales se destacan los que se encuentran a lo largo de los ríos Chaquenodá, Pegadó, río Sucio, Uramita, Musinga y las quebradas Cañaverales y Nutibara (INGEOMINAS, 2010). También se encuentran depósitos de vertiente (Q2v) compuestos por acumulaciones heterogéneas no diferenciadas en zonas de pendientes altas producidas por procesos erosivos, flujos de escombros, coluviones de roca y tierra. En la Plancha 114-Dabeiba, la formación de grandes depósitos

de vertiente está íntimamente asociada a trazas de falla y al fracturamiento intenso de algunas de las unidades litológicas, que unido a una topografía montañosa con altas pendientes, deforestación, erosión y profundización de los ríos y quebradas, además de la acción del hombre en obras de infraestructura, tala de bosque y sobre pastoreo ha dado como resultado la formación de flujos de lodo y/o escombros en la parte inferior de las vertientes de inclinación alta a moderada. Los depósitos de vertiente se encuentran dispersos sobre toda el área de la plancha, pero principalmente en la zona central, donde se presenta un intenso fallamiento de las rocas con un fracturamiento importante asociado (INGEOMINAS, 2010).

Desde el punto de vista geomorfológico las formas de relieve de la plancha 114-Dabeiba, de la cual se presenta una imagen representativa en la Figura 5, son el resultado de la conjunción de numerosos factores como: litología, estructuras geológicas, tectónica y clima, que a su vez, se encuentran íntimamente relacionados con los procesos denudativos (erosión y movimientos en masa) (SGC, 2015). Dentro del ambiente denudacional se incluye las geoformas cuya expresión morfológica está definida por la acción combinada de procesos moderados a intensos de meteorización, erosión y transporte de origen gravitacional y pluvial que remodelan y dejan remanentes de las unidades preexistentes y de igual manera, crean nuevas por la acumulación de sedimentos (SGC, 2015).

Las geoformas asociadas al ambiente denudacional en la zona corresponden a conos coluviales, en forma de cono o lóbulo (Dco), con laderas convexas de longitudes cortas a largas y pendientes que varían entre inclinadas a abruptas. Tienen rasgos característicos como albardones o diques longitudinales, canales en forma de U, trenes de bloques rocosos y sectores con bloques individuales de gran dimensión. Su origen está relacionado al transporte torrencial de sedimentos clasto soportados (SGC, 2015). También se observan conos de deslizamiento indiferenciado (Ddi), como estructura en forma de cono o lóbulo de morfología baja, cóncava a convexa, con una pendiente escalonada, nichos semicirculares, bloques inclinados, relieve irregular, formación de grietas y cambios súbitos de la pendiente. Su origen está relacionado a procesos de movimientos en masa de tierra o roca, cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla o en zonas con alta deformación cortante (SGC, 2015).

En la zona también hay unidades que hacen parte del ambiente fluvial el cual incluye las geoformas que se originan por procesos de erosión de las corrientes de los ríos y por la acumulación o sedimentación de materiales en las áreas

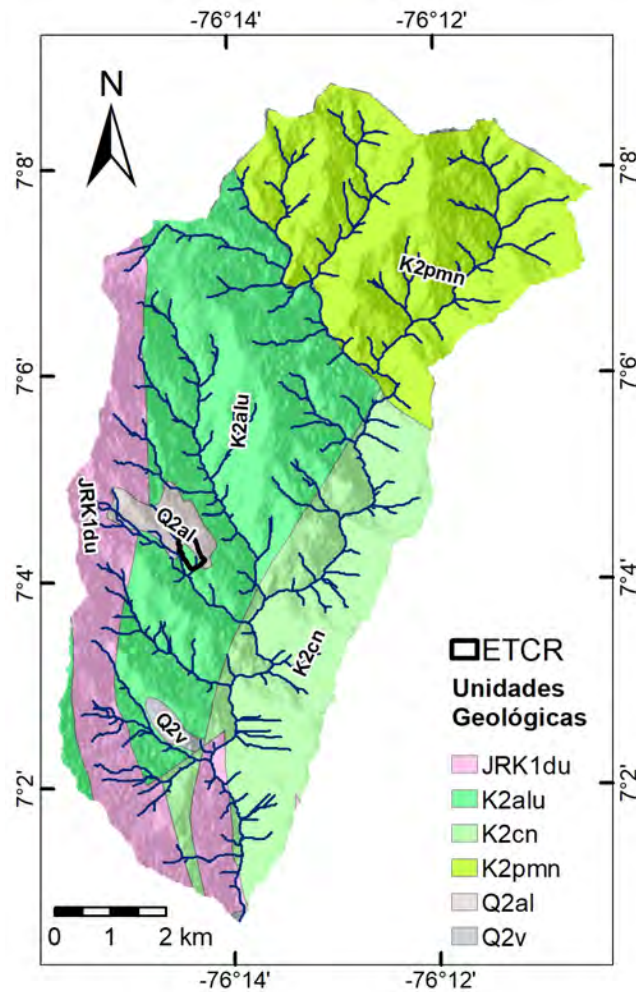


Figura 4: Mapa Geológico 1:100.000 predio Llano Grande

aledañas a dichas corrientes, tanto en épocas de grandes avenidas e inundación, como en la dinámica normal de las corrientes perennes, durante la época seca. De esta manera, es posible encontrar unidades aledañas a ríos, quebradas y en el fondo de los cauces, cuyos depósitos son transportados y acumulados cuando éstas pierden su capacidad de arrastre (SGC, 2015). Correspondiente a este ambiente únicamente se encuentra la geoforma descrita por SGC (2015) como Terraza de Acumulación (Fta) (Figura 9) que se define como una superficie elongada, plana a suavemente ondulada, modelada sobre sedimentos aluviales, que se presenta en forma pareada, limitada por escarpes de diferente altura a lo largo del cauce de un río. Su origen está relacionado a procesos de erosión y acumulación aluvial, dentro de antiguas llanuras de inundación. Su formación incluye fases de acumulación, incisión y erosión vertical. Estas terrazas pueden ser parte de cauces rectos a meándricos. Su depósito está constituido por gravas

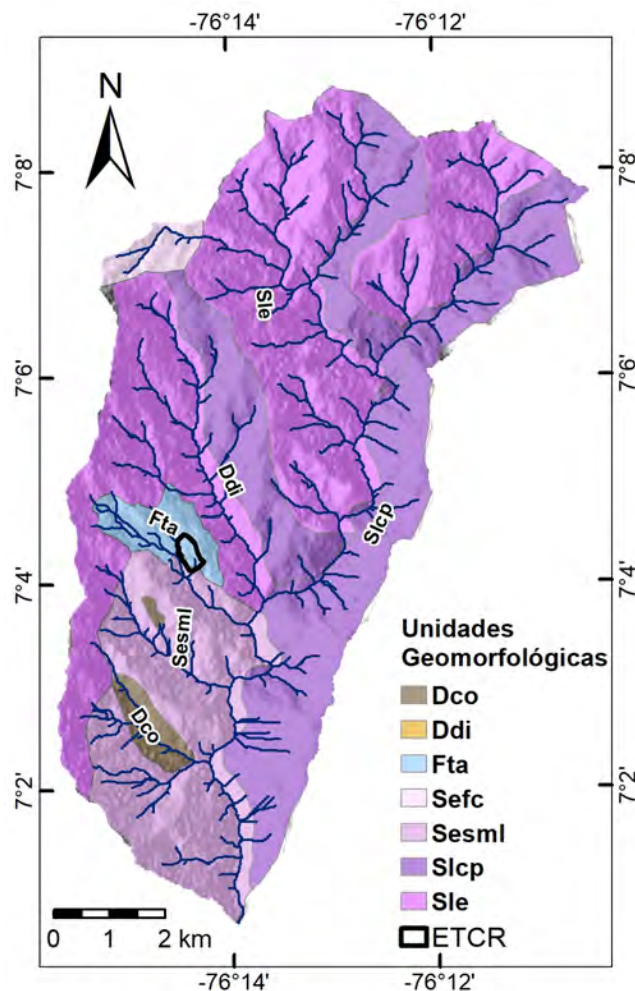


Figura 5: Mapa Geomorfológico 1:100.000 predio Llano Grande

arenas, limos y arcillas, con disminución del tamaño a medida que se aleja del cauce del río (SGC, 2015).

Por otro lado, en el ambiente estructural, que incluye las geoformas que se originan por procesos relacionados con la dinámica interna de la tierra, se presentan espolones faceteados (Sefc), saliente que en conjunto conforma sierras colinadas con pendiente inclinada a abrupta. Su origen se relaciona al fallamiento que genera truncamiento a manera de facetas triangulares y a procesos de erosión diferencial en unidades de distinta resistencia (SGC, 2015). Los espolones moderados de longitud larga (Sesml) (Figura 8) representan salientes de morfología alomada, dispuesta perpendicularmente a la tendencia estructural general de la región, desarrollados sobre rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias y limitado por drenajes paralelos a subparalelos. Las laderas de contrapendiente (Slcp) (Figura 7) son superficies en declive, de morfología regular a irregular,

definida por planos (estratos, foliación, diaclasamiento entre otros) dispuestos en sentido contrario a la inclinación del terreno. Puede presentarse con longitud larga a extremadamente larga y con pendientes suavemente inclinadas a escarpadas. En esta geoforma los datos estructurales no permiten establecer una asociación con alguna estructura de tipo regional (anticlinal, sinclinal, homoclinal, monoclinal, entre otros) (SGC, 2015). Las laderas estructurales (Sle) (Figura 6) son de superficie en declive, de morfología regular a irregular, definida por planos preferentes (estratos, foliación, diaclasamiento entre otros) paralelos al sentido de la inclinación del terreno. Puede presentarse con longitud larga a extremadamente larga y con pendientes suavemente inclinadas a escarpadas. En esta geoforma los datos estructurales no permiten establecer una asociación con alguna estructura de tipo regional (anticlinal, sinclinal, homoclinal, monoclinal, entre otros) (SGC, 2015). En la Figura 10 se muestra el mapa litoestructural de la cuenca.



Figura 6: Panorámica de Ladera Estructural (Sle)

1.4. 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



Figura 7: Panorámica de contrapendiente (Slcp)



Figura 8: Panorámica de Espolón moderado de longitud larga



Figura 9: Panorámica de Terraza de Acumulación (Fta)

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

1.4.1. Variación temporal

A continuación se presenta el análisis multitemporal de la variable precipitación en el área de influencia del antiguo ETCR LLano Grande, utilizando las estaciones del IDEAM y los datos del CHIRPS.

1.4.1.1. Datos estaciones pluviométricas IDEAM

Se tomaron las estaciones pluviométricas del IDEAM más cercanas al área de estudio del antiguo ETCR-Llano Grande, las cuales son mostradas en la Tabla 1 y su ubicación se visualiza en la Figura 11. Es pertinente resaltar que, solo

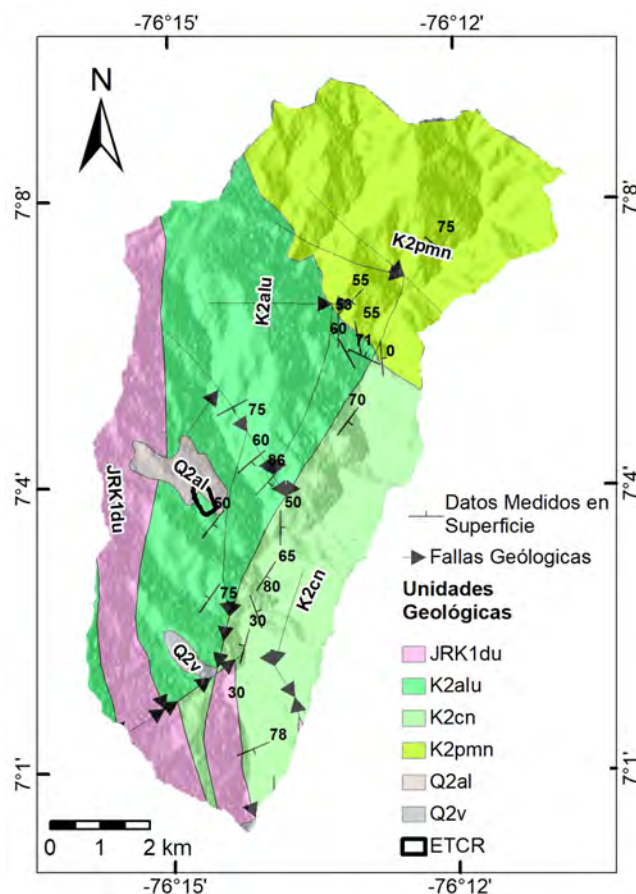


Figura 10: Mapa litoestructural asociado a la cuenca del antiguo ETCR Llano Grande

existe una estación pluviométrica del IDEAM, próximo al antiguo ETCR, que registre información en la actualidad, esto dificulta el entendimiento espacial de cómo las precipitaciones pueden cambiar a lo largo del territorio utilizando información medida directamente sobre el área de interés.

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 Llano Grande.

Estación	Código	Inicio del registro	Datos faltantes (%)
FUEMIA	11110030	1977-03-12	2,4

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-

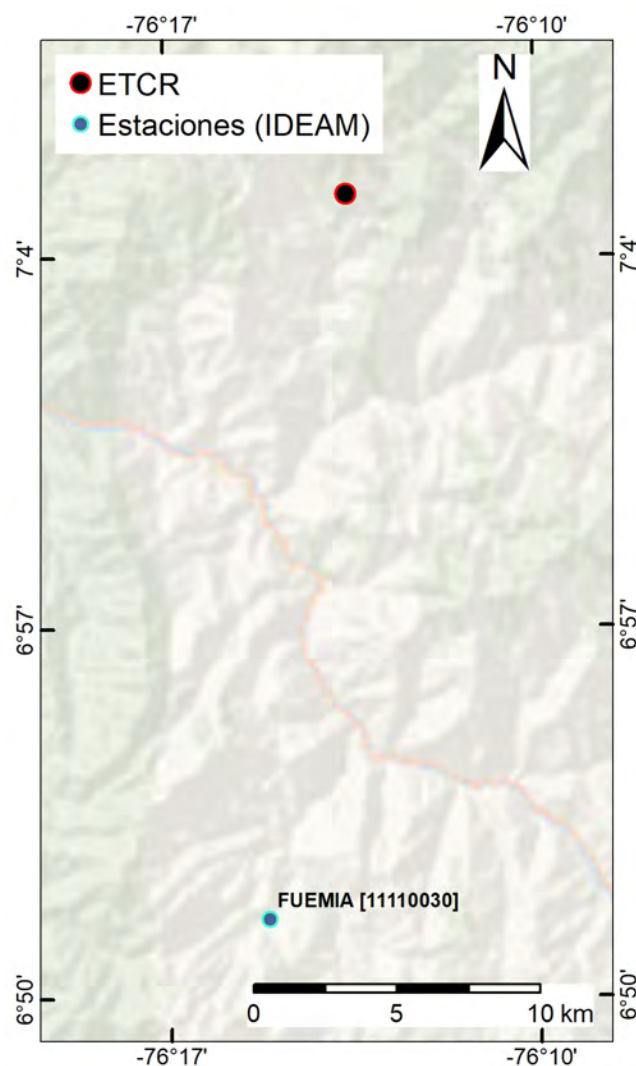


Figura 11: Estaciones IDEAM cercanas al antiguo ETCR-Llano Grande

precipitaciones diarias multianuales, donde se busca los valores medios y máximos para cada uno de los días, el resultado se muestra en la Figura 12, donde la línea azul pálida representa la precipitación máxima diaria multianual (PDMax), la línea azul oscuro es la PDMax con promedio móvil de 5 días (PDMA), la línea negra pálida son los datos de precipitación media diaria multianual (PDMean) y la línea negra representa PDMean con promedio móvil de 5 días (PMDMA). Como se puede observar en los resultados, la precipitación diaria máxima reportada por la estación Fuemia supera en algunos días 175 mm. En cuanto a la precipitación media diaria multianual varía alrededor de los 4,1 mm/día.

Precipitación mensual multianual con estaciones IDEAM. La Figura 13 presenta la información a escala mensual de la estación Fuemia con

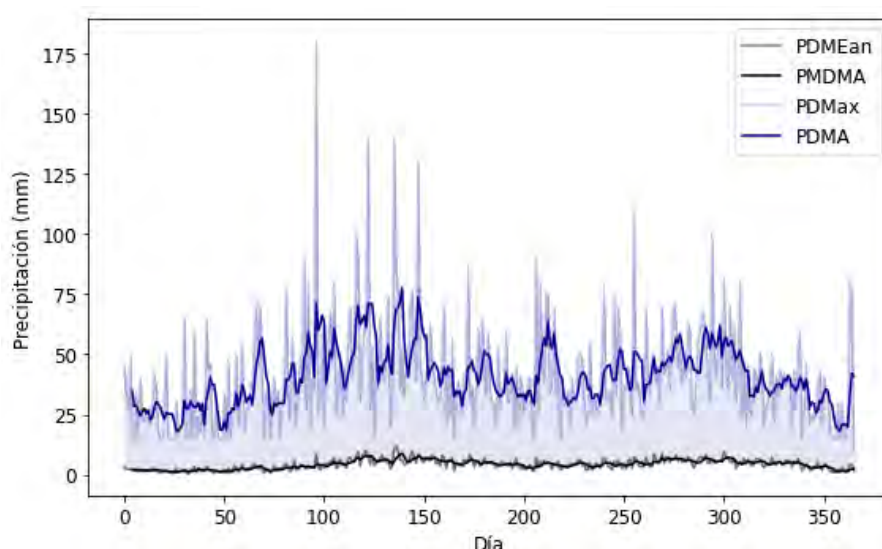


Figura 12: Precipitación diaria multianual estación Fuemía

precipitación media mensual multianual de 126,2 mm/mes. Se observa que las precipitaciones presentan un comportamiento bimodal, con dos temporadas de lluvia, una en los meses de Abril, Mayo y junio y la siguiente en Septiembre, Octubre y Noviembre, con precipitaciones medias mensuales multianuales que alcanzan 200 mm/mes para el mes de Mayo. Por otra parte se tiene dos periodos de sequía, uno en los meses de Julio y Agosto y el otro en Diciembre, Enero y Febrero; donde en este último periodo se presentan el déficit más bajo de la precipitación media mensual multianual. En lo que respecta a las precipitaciones máximas y mínimas a escala mensual, se observa que las lluvias máximas pueden alcanzar los 500 mm al mes.

Analizando los resultados mostrados en la Figura 13b sobre la precipitación media mensual multianual en periodos El Niño Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés) se tiene un leve aumento de las precipitaciones cuando transcurre La Niña pero, el cambio en los meses de Abril, Mayo, Junio, Septiembre y Octubre no es significativo cuando se tiene la presencia de alguno de las das fases.

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*

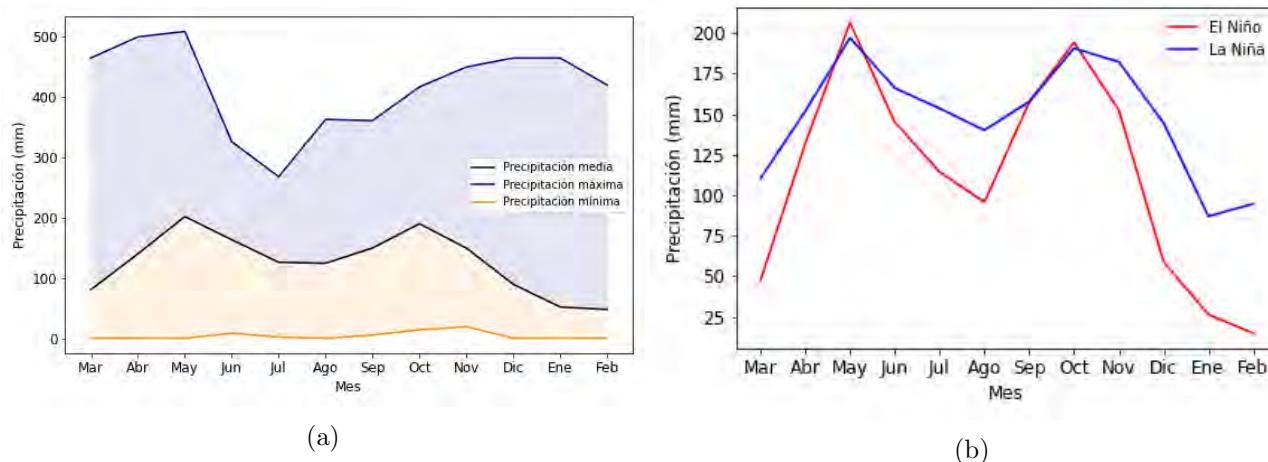


Figura 13: Precipitación mensual multianual para la estación Fuemia, a) Valores medios, máximos y mínimos. b) Precipitación media mensual multianual para meses con ocurrencia del El Niño y La Niña

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 se presentan en la Figura 14. Se puede evidenciar que la precipitación máxima a escala anual alcanza el orden de los 3000 mm/año durante el transcurso de un periodo La Niña, por debajo de los 500 mm/año se pueden registrar precipitaciones mínimas anuales y en lo que respecta a la precipitación media se observan valores de 1517,7 mm/año.

1.4.1.2. Datos estimados por satélite CHIRPS

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

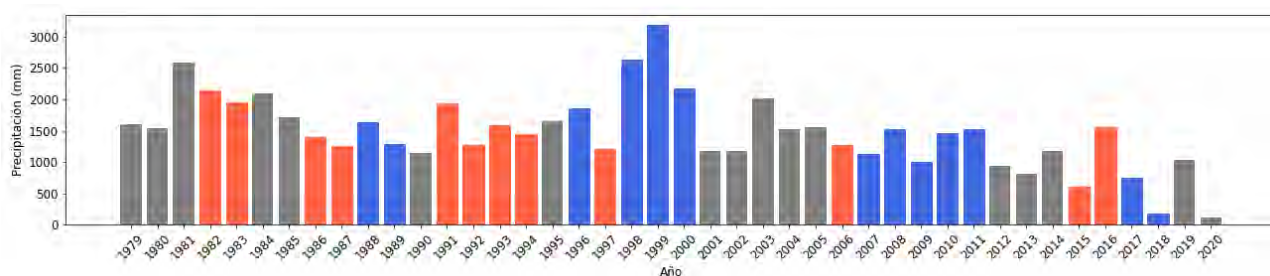


Figura 14: Precipitación anual multianual de la estación Fuemia, donde, las barras color rojo representan la ocurrencia de El Niño, el color azul La Niña y el gris periodos Neutros.

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

Precipitación diaria multianual CHIRPS. Los resultados mostrados en la Figura 15 hacen referencia al análisis de las precipitaciones diarias multianuales sobre la cuenca de la quebrada Chimiadó, 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 (la línea color azul opaco) por encima de los 80 mm/día y la precipitación media (línea negra opaca) puede oscilar alrededor de los 15 mm al día.

Precipitación mensual multianual CHIRPS. La Figura 16 señala que las precipitaciones sobre el territorio son bimodales, con picos de precipitaciones en los meses de Mayo y Noviembre sobrepasando los 300 mm/mes. También existen periodos donde se presentan precipitaciones medias multianuales de baja intensidad, alcanzando los 100 mm/mes. Con relación a los eventos extremos, se puede evidenciar que, según CHIRPS, la precipitación máxima alcanza los

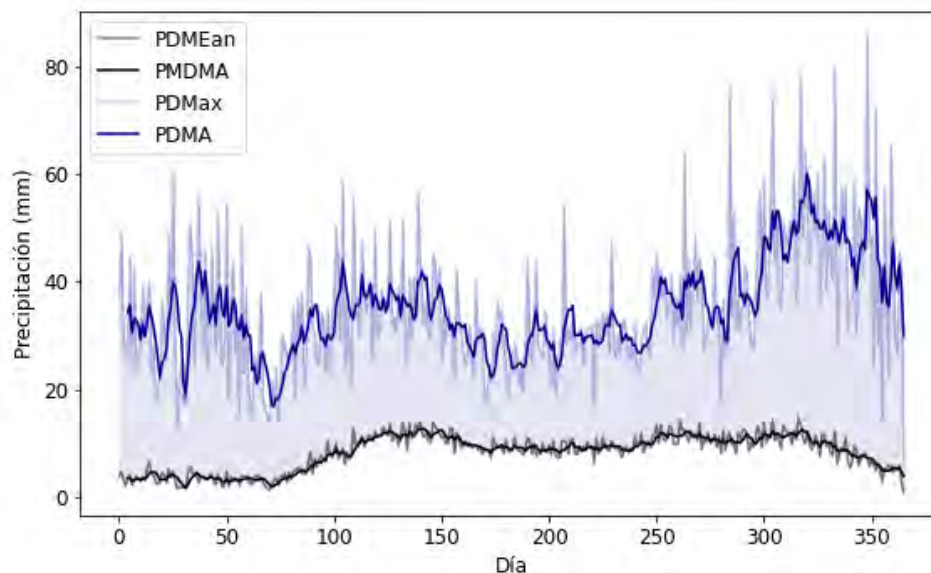


Figura 15: Precipitación diaria multianual estimación CHIRPS a nivel de cuenca

500 mm/mes y los meses con menores precipitaciones pueden llegar a reportar 0 mm/mes.

En lo que respecta a la precipitación media mensual multianual en meses El Niño y La Niña (Figura 16a), se visualiza que, según lo captado por CHIRPS, en los meses de Junio a Agosto y de Diciembre a Enero, en eventos La Niña, existe un ligero aumento de las precipitaciones y en los meses de Enero y Febrero es perceptible la disminución de las practicones a causa de el Niño. En lo que respecta a los demás meses donde, en promedio, la ocurrencia de uno u otro evento es imperceptible al transcurso de El Niño o La Niña.

Precipitación Anual CHIRPS. La Figura 17 señala los valores de lluvia anual, registrados por CHIRPS, los cuales oscilan entre 2300 a 3500 mm/año. Adicionalmente, es posible apreciar que los cambios en las precipitaciones son leves con la ocurrencia de eventos El Niño o La Niña.

1.4.2. 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 estación Fuemia, agregando los datos a escala diaria, mensual y anual.

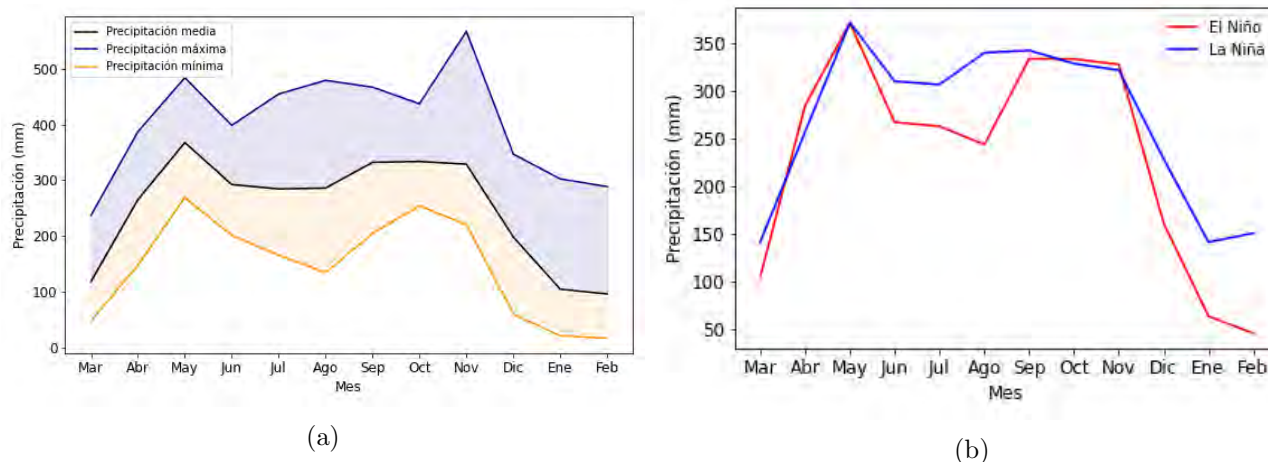


Figura 16: Precipitación mensual multianual CHIRPS a nivel de cuenca, a) Valores medios, máximos y mínimos. b) Precipitación media mensual multianual para meses con ocurrencia del El Niño y La Niña

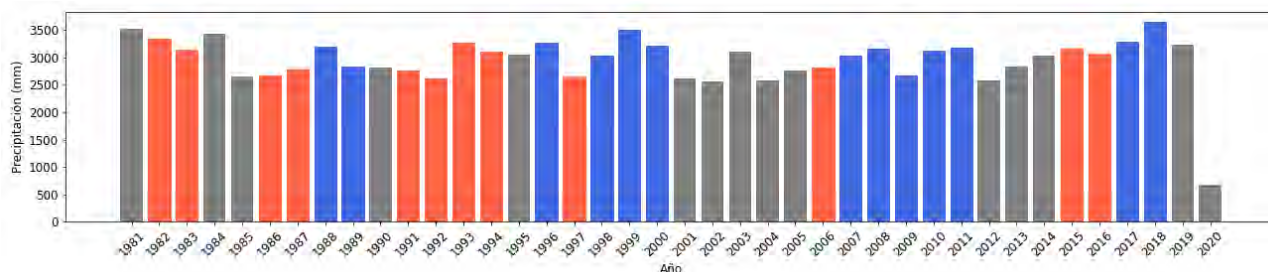


Figura 17: Precipitación anual multianual CHIRPS a nivel de cuenca, donde, las barras color rojo representan la ocurrencia de El Niño, el color azul La Niña y el gris periodos Neutros.

Los resultados a escala diaria son mostrados en la Figura 18a. Se visualiza que no existe una correlación definida entre las variables, más específicamente se tiene que, el coeficiente de correlación de Pearson entre CHIRPS y la estación del IDEAM es de 0,15. Todo lo contrario ocurre a escala mensual (Figura 18b), donde se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson aceptable de 0,6. Por último a escala anual (Figura 18c), se tiene como coeficiente de correlación de Pearson un valor de 0,5, lo cual indica que a escala mensual y anual existe una correlación moderada entre los datos de CHIRPS e IDEAM.

1.4.3. 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 cer-

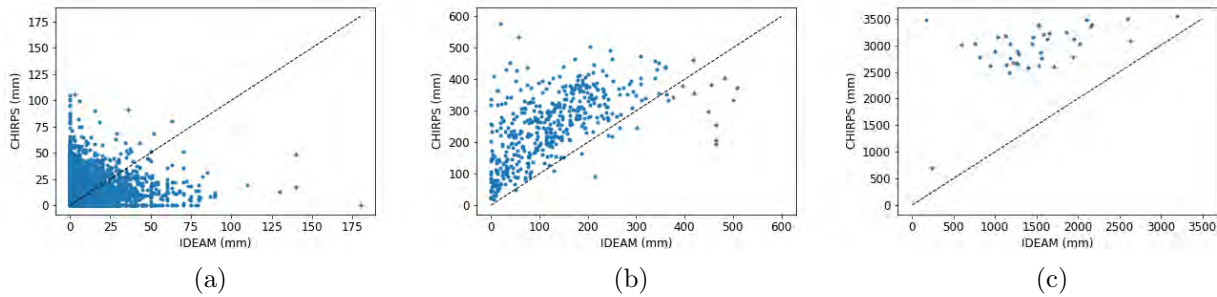


Figura 18: Correlación de la información dada por los pluviómetros del IDEAM y CHIRPS en la estación FUEMIA a escala a) Diaria, b) Mensual y c) Anual.

tero 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 19, donde se puede observar que los valores medios diarios pueden oscilar entre los 7,2 a 9,3 mm/día, adicionalmente se infiera que en el costado occidental de la cuenca de la quebrada Chimiadó se presentan en promedio las máximas precipitaciones. Por otro lado, las precipitaciones máximas a escala diaria (Figura 19b) han ocurrido en la zona sur-occidental de la cuenca alcanzando los 130 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 20 donde, al igual que a escala diaria, la máxima precipitación media mensual (Figura 20a), ocurren al costado occidental de la cuenca y los valores en los cuales varían son entre los 219 a los 283 mm/mes, así mismo se puede evidenciar en el mapa de precipitaciones máximas (Figura 20b), que la zona con mayores precipitaciones en todo el registro histórico, a escala mensual, es el costado occidental de la cuenca, llegando a acumular 726 mm en un mes. La Figura 20c presenta la distribución espacial de las precipitaciones mínimas. Se puede determinar que en la zona norte de la cuenca es donde se han presentado las precipitaciones más bajas, alrededor de los 15 mm/mes.

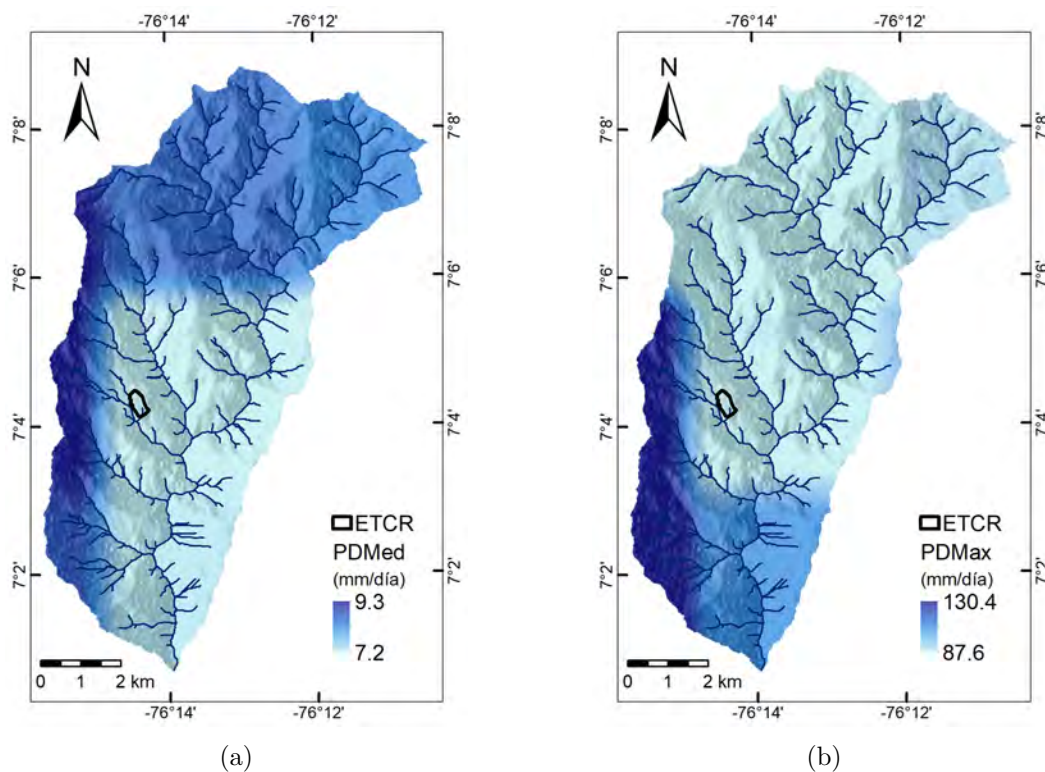


Figura 19: Variación espacial de la a) Precipitación diaria media (PDMed) y b) Precipitación diaria máxima (PDMax)

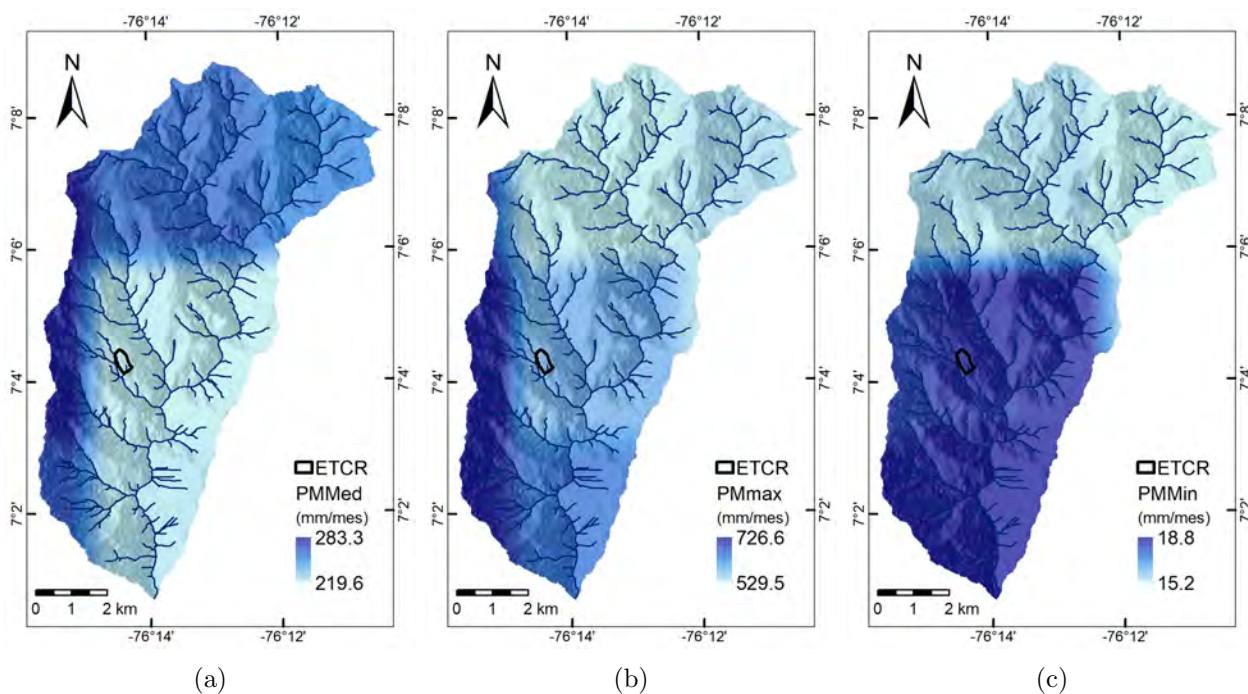


Figura 20: Variación espacial de la a) Precipitación mensual media (PDMed), b) Precipitación mensual máxima (PDMax) y c) Precipitación mensual mínima (PDMin)

1.5. Información secundaria

A continuación se presentan los estudios revisados como información secundaria para la zona de estudio.

1.5.1. 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 Dabeiba, y de esta forma obtener 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 describen de forma general los estudios obtenidos de mayor relevancia para el objeto del estudio en el municipio de Dabeiba:

- **Zonificación de amenazas y riesgos de origen natural y antrópico del área urbana del municipio de Dabeiba como herramienta fundamental en la planificación del territorio (Corpourabá, 2010)**
Elaborado para realizar la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo, a partir del análisis de antecedentes, información climática, hidrológica e hidráulica, levantamientos topográficos, levantamientos geológicos y la identificación de procesos y zonificación geomorfológica. Con el objetivo de presentar un plan de mitigación de riesgos y la identificación de viviendas en zonas de riesgo no mitigable y su posterior inclusión en el POT. En este estudio se incluyeron también el diseño de obras de mitigación y control con el objetivo de minimizar los niveles de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, sobre todo para las viviendas ubicadas sobre las terrazas inundables del río Sucio y zonas afectadas por torrencialidad, buscando la recuperación y preservación ambiental de la ronda hídrica más asociada al área urbana.
- **Memoria explicativa de Zonificación de la Susceptibilidad y la Amenaza relativa por Movimientos en Masa, escala 1:100.000, Plancha 114 Dabeiba escala 1:100.000 departamentos de Antioquia y Choco (SGC, 2015)** Estudios de susceptibilidad y amenaza utilizando la metodología de Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) que reposa en el documento de la zonificación de la susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa, escala 1:100000 establecido por el SGC en el año 2013. En esta evaluación de la susceptibilidad y amenaza se emplearon

variables cualitativas relacionadas con la geología, geomorfología, suelos y coberturas; mientras que, en la implementación de variables cuantitativas se tuvieron la pendiente, rugosidad y flujo acumulado, todos ellos derivados de modelos digitales de elevación (MDE). Cada una de estas variables fue elaborada, calificada y validada por los expertos en cada una de las temáticas, a partir de las cuales se generó el modelo de zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa. Para dicho proceso fue necesario contar con distintos insumos que permitieran la zonificación, iniciando con el área, determinada por la cartografía básica suministrada por Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) en escala 1:100.000.

- **Geología de la plancha 114 - Dabeiba (SGC, 2013)** Corresponde a un informe que hace parte del proyecto “Potencial de Recursos del Subsuelo de la cordillera Occidental” en el cual se identificó que la plancha 114-Dabeiba a escala 1:100.000 presentaba algunas inconsistencias estratigráficas y de geología estructural, razón por la que se decidió reincorporar las labores de campo enfocadas en la descripción de estructuras geológicas y levantamientos geológicos y de columnas estratigráficas, complementando también toda la información disponible sobre litogeoquímica y geocronología, con el objetivo de mejorar la calidad de los datos que dicha plancha proporcionaba. En lo que respecta a la amenaza en general, se resalta el hecho de considerar para toda el área de interés las corrientes presentes, como típicas de zonas montañosas. Identificando las zonas bajas de Dabeiba como altamente inundables, entre las que destacan los sectores asociados a las quebradas La Seca, El Tigre, Palo Hueco y Camparrusia. De igual forma, se describe para toda el área de estudio la amenaza sísmica alta a nivel regional y se destacan sismos registrados en 1957 y 1960 que afectaron directamente el poblado de Dabeiba; al igual que la ubicación de la cabecera municipal sobre complejos de terrazas, conos de deyección, abanicos aluviales y torrenciales de quebradas que atraviesan el área urbana y que evidencian carácter torrencial como la quebrada La Desmontadora y zonas que pueden presentar movimientos en masa que ocasionen posteriores obstrucciones de cauces principales.
- **Plan de ordenación y manejo de la cuenca río Sucio alto. Fase de diagnóstico, informe de geología (Corpourabá, 2019)** Realizado con el objetivo de estudiar la que se considera un área muy compleja

tectono-estratigráficamente de la cordillera Occidental, basado en la interpretación de sensores remotos a escala 1:25.000, por medio del uso de imágenes Landsat 2000 y 2001, imágenes Quickbird 2010 e información topográfica del IGAC 1:25.000 y 1:10.000, para obtener una actualización de la cartografía geológica proporcionada por INGEOMINAS y el Servicio Geológico Colombiano (SGC), apoyada en el trabajo de campo y aportando mayor precisión para interpretaciones de sedimentos coluviales. Se realizaron trabajos de cartografía geotécnica teniendo en cuenta los parámetros definidos para la gestión del riesgo en los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas, de los que se concluye que la zona de estudio, en épocas de altas precipitaciones, puede presentar deslizamientos con falla circular profunda, sobre todo en puntos con espesos perfiles de meteorización, los cuales abundan y suelen estar asociados a cambios de plasticidad y granulometría.

1.5.2. Información cartográfica

Para el presente estudio 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 de geotiff y con datum EGM96 (*Earth Gravitational Models*), el cual utilizado por el geoide de referencia del WGS (*World Geodesic System*).

En términos de imágenes satelitales disponibles, se utilizaron las misiones de observación terrestre *Sentinel* de la Agencia Espacial Europea y *Landsat* de la Administración Nacional Espacial y Aeronáutica (NASA por sus siglas en

inglés) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés). Estas imágenes se obtuvieron y procesaron a través de la herramienta *Google Earth Engine* (<https://earthengine.google.com/>)

Del programa *Copernicus* se utilizaron imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2. 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 21 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 cuatro bandas en el infrarrojo visible y cercano (VNIR; 690-710 nm, 730-740 nm, 770-790 nm y 850-870 nm) y dos bandas de infrarrojo de onda corta (SWIR; 1.560-1.650 nm y 2.100-2.280 nm) para aplicaciones como nieve, hielo y detección de nubes o evaluación de la humedad de la vegetación con resolución espacial de 20 m. Y, finalmente, tres bandas de 60 m de resolución espacial centradas en la detección de nubes y corrección atmosférica para aerosoles (430-450 nm), vapor de agua (930-950 nm) y detección de cirros (1.360-1.390 nm) (ESA, 2020; GoogleEarthEngine, 2020b). De esta misión para la zona de estudio se cuenta con registro desde el año 2018 y se obtienen imágenes anuales procesadas en la plataforma *Google Earth Engine* para reducir su cobertura de nubes y se presenta una imagen representativa en la Figura 22 correspondiente al año 2020.

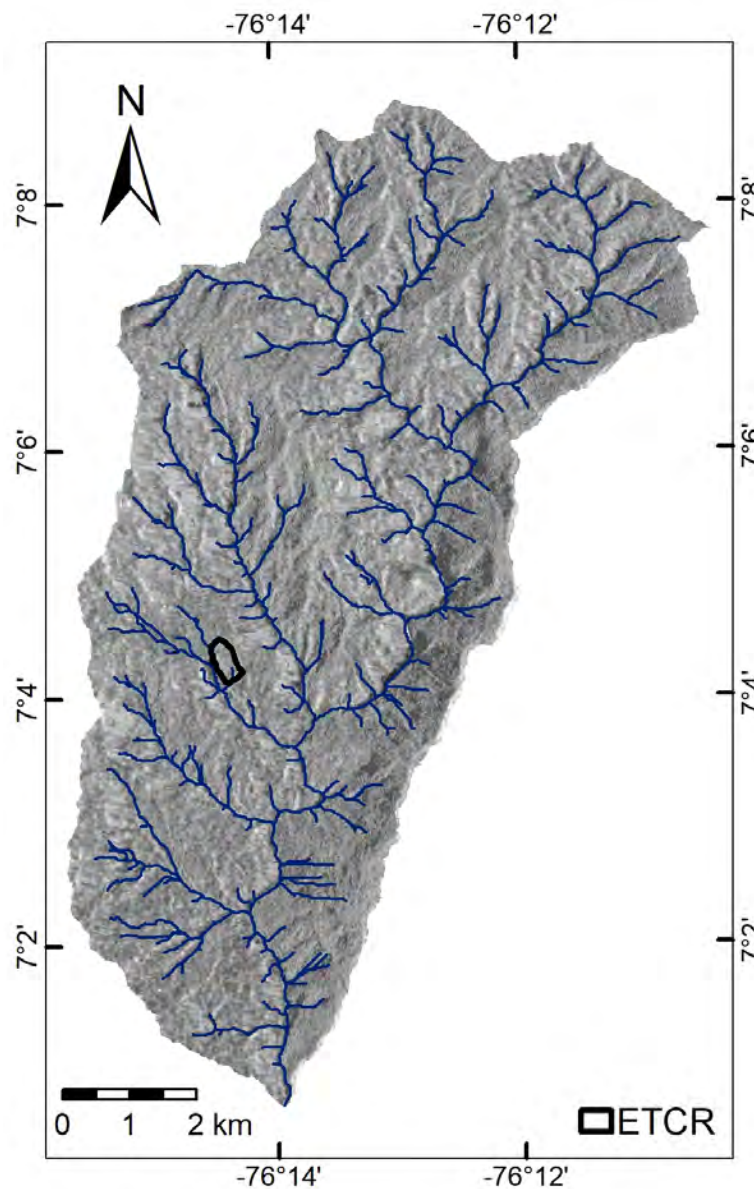


Figura 21: Imagen satelital representativa de la misión Sentinel 1 del año 2020.

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

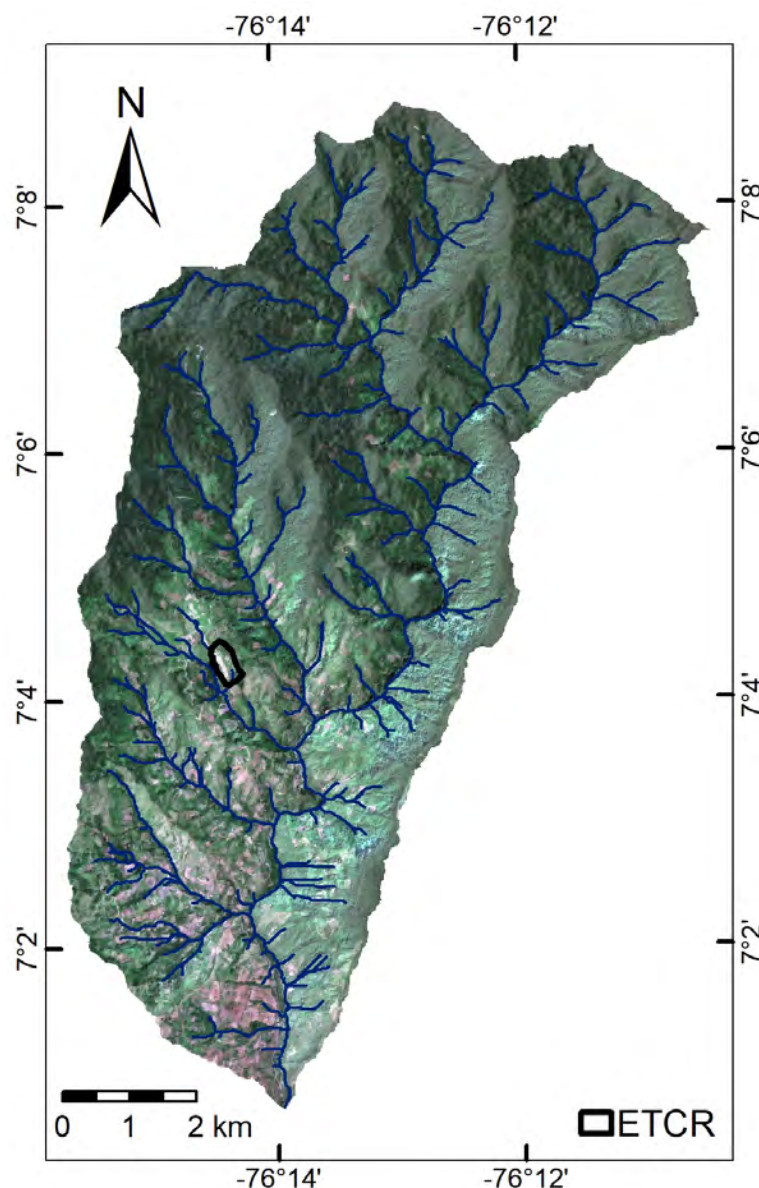


Figura 22: Imagen satelital representativa de la misión Sentinel 2 del año 2020.

procesadas en la plataforma *Google Earth Engine* para reducir su cobertura de nubes. La Figura 23 corresponde a una imagen del año 2017 que cubre el antiguo ETCR Llano Grande.

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 Landsat 5 se cuenta con registro del antiguo ETCR Llano Grande desde el año 1984 hasta el año 2011, aunque no de forma continua, del Landsat

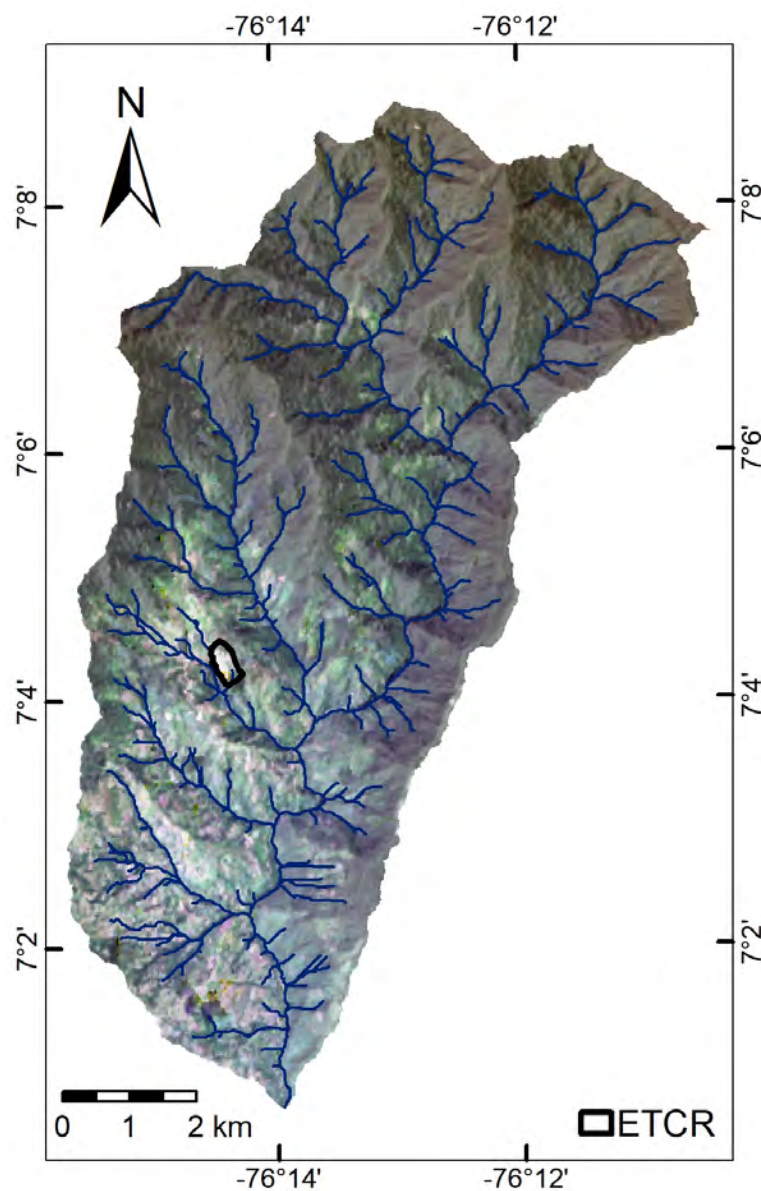


Figura 23: Imagen satelital representativa de la misión Landsat 8 del año 2017.

4 se cuenta con registros entre los años 1988 y 1993, aunque no de forma continua. La Figura 24 presenta una de las imágenes más antiguas del programa Landsat 5 que se obtuvo de la zona de estudio, año 1987.

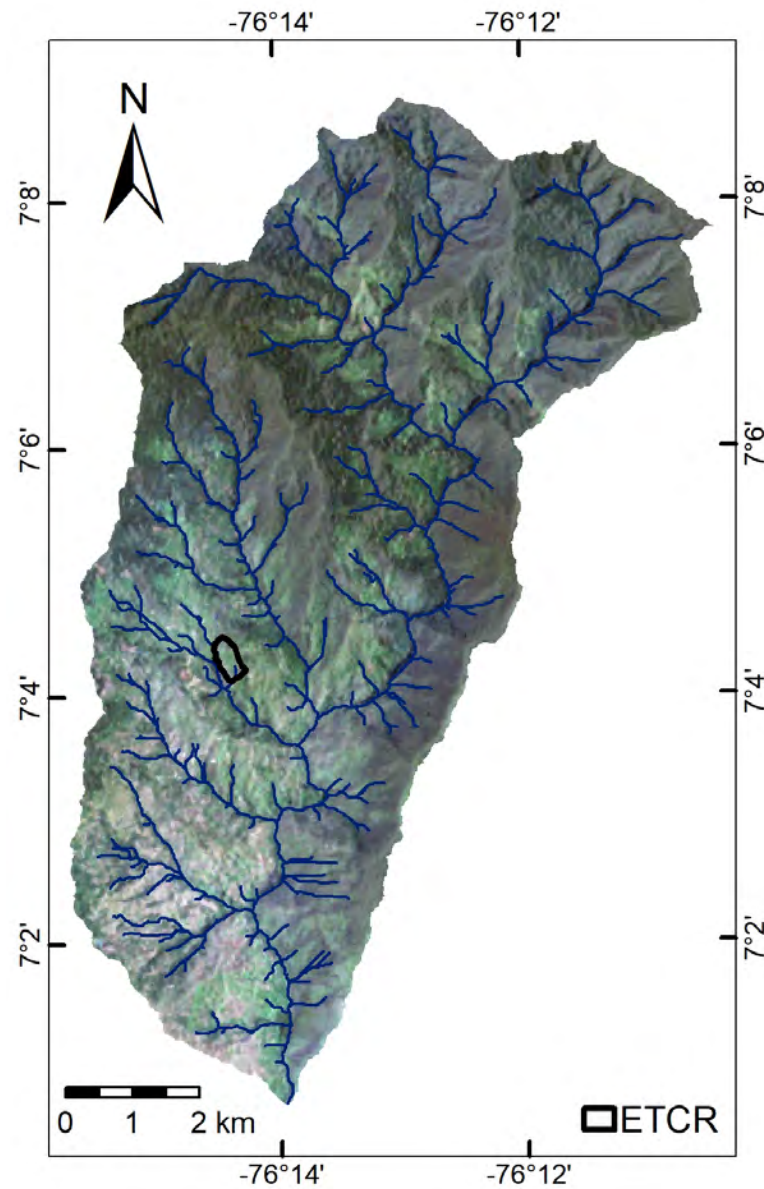


Figura 24: Imagen satelital representativa de la misión Landsat 5 del año 1987.

Referencias

- CEPRI -UPB. (2017). *Seguimiento a las zonas veredales transitorias de antioquia: Dabeiba*. Descargado de <https://cepri.upb.edu.co/index.php/lineas-de-investigacion/gobierno-territorio-y-seguridad/seguimiento-a-las-zonas-veredales-transitorias-de-antioquia-dabeiba>
- Corpourabá. (2010). *Zonificación de amenazas y riesgos de origen natural y antrópico del área urbana del municipio de dabeiba como herramienta fundamental en la planificación del territorio* (Inf. Téc.).
- Corpourabá. (2019). *POMCA Rio Sucio Alto* (Inf. Téc.).
- 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. (2010). *Memoria Explicativa Geología de la parte oriental de la plancha 114 Dabeiba* (Inf. Téc.). Medellín: INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA.
- 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. (2013). *Geología de la Plancha 114 Dabeiba* (Inf. Téc.).
- SGC. (2015). *Memoria explicativa de Zonificación de la Susceptibilidad y la Amenaza relativa por Movimientos en Masa, escala 1:100.000, Plancha 114 Dabeiba escala 1:100.000 departamentos de Antioquia y Choco*. (Vol. 13; Inf. Téc. n.º 3). Bogotá: Autor.

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 Espacio Territorial de Capacitación y Reincorporación -ETCR- localizado en el municipio de Dabeiba, 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 estudio tendrá en cuenta en el análisis, no solo la zona donde se ubica el antiguo ETCR lo, 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 implemen-

tación en las normas urbanísticas del municipio objeto de estudio, de acuerdo al estado de vigencia de su Plan Básico 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 V) 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 antiguos Espacios Territoriales de Capacitación y Reincorporación ETCR. Sin embargo, antes de adentrarnos en el estudio normativo o marco jurídico que permitirá establecer el sustento legal o viabilidad jurídica para la formalización de los proyectos de vivienda, es necesario, conocer como fue el proceso de surgimiento de estas zonas y el espíritu con el cual fueron creadas.

La Ley 1779 de 2016, modificatoria de la Ley 418 de 1997 en el parágrafo 3º 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 expidieron 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 del 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 Espacios Territoriales de Capacitación y Reincorporación.

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) tendrá 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 - ETCR tendrían una duración de dos (2) años contados a partir de la fecha establecida en los artículos 1 y 2 del Decreto 1274 de 2017, permitiendo la posibilidad de modificarlos, suprimirlos o prorrogarlos según las necesidades del caso. Conforme a esto, su vigencia se extendió hasta el 15 de agosto de 2019.

De igual forma dispuso en el artículo 6° que la administración de estos espacios, estaría a cargo del Fondo de Programas Especiales para la Paz hasta el 31 de marzo de 2018 o una vez finalizada la transferencia de cada uno de los - ETCR, señalando además que dentro de este término, dicho Fondo debía efectuar la transferencia de los bienes destinados para el funcionamiento de los Espacios Territoriales de Capacitación y Reincorporación - ETCR 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 cuya vigencia de acuerdo con las normas revisadas, expiró el 15 de agosto de 2019 (Figura 25). 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 25: Proceso de consolidación de los antiguos ETCR. Fuente Convenio 752 de 2020

2.2. Viabilización del antiguo ETCR Llano Grande 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 PBOT 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 Plan Básico 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 2015¹ 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

¹En 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.

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 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.

A continuación se presentan los actos administrativos mediante el cual se adoptó el PBOT del municipio de Dabeiba 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 012 de Julio 09 de 2000 (Adopción del PBOT) (No suministrado)
- Acuerdo 024 de Diciembre 28 de 2012 (Modificación Excepcional de norma urbanística) (Norma aplicada)

Vigencia

- Expirada en su contenido de largo plazo el 31/12/2011

2.2.2. Procedimiento de revisión y ajuste de los POT

Luego de la evaluación de la vigencia del PBOT del municipio de Dabeiba, se concluye que sus contenidos de corto, mediano y largo plazo han expirado, aunque mientras se adopte un nuevo POT se considera que el cuerpo normativo se encuentra vigente y puede continuar aplicando norma urbanística con base en el Acuerdo Municipal 24 de 2012, 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 26², se presenta un posible cronograma de ejecución del proyecto habitacional en un escenario de *revisión ordinaria del PBOT* como punto de partida y culminando con la entrega de viviendas de interés social rural.

²El tiempo máximo de aprobación del POT en el Consejo 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 PBOT se recomienda tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Su incorporación en debida forma al PBOT 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 PBOT 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 PBOT, 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 PBOT.

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

³El tiempo máximo de aprobación del POT en el Consejo 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 modificación excepcional de normas urbanísticas del PBOT se recomienda tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Su incorporación en debida forma al PBOT 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, concierten y aprueben el proyecto de PBOT en un corto tiempo sin hacer uso de los términos máximos permitidos por la ley 388 de 1997.
- 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 PBOT.

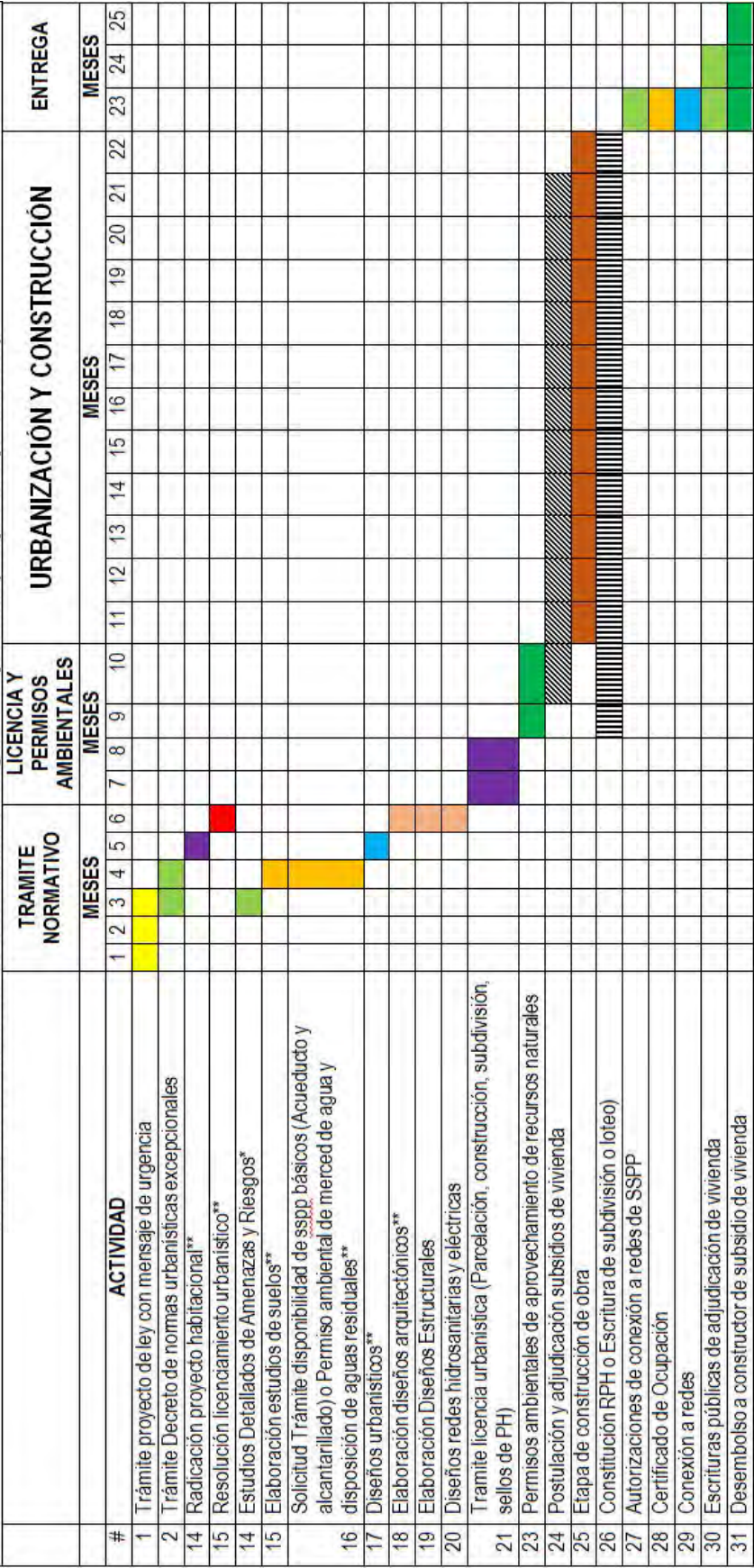
2.2.2.3. Creación de un marco normativo excepcional para proyectos de vivienda y usos complementarios para el proceso de reincorporación

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 28 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

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



Notas:

* 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 POT.

** 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 28: Cronograma aproximado para un escenario Ley

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 periodos 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 periodos 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 pro-

nunciamiento 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 Dabeiba

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.

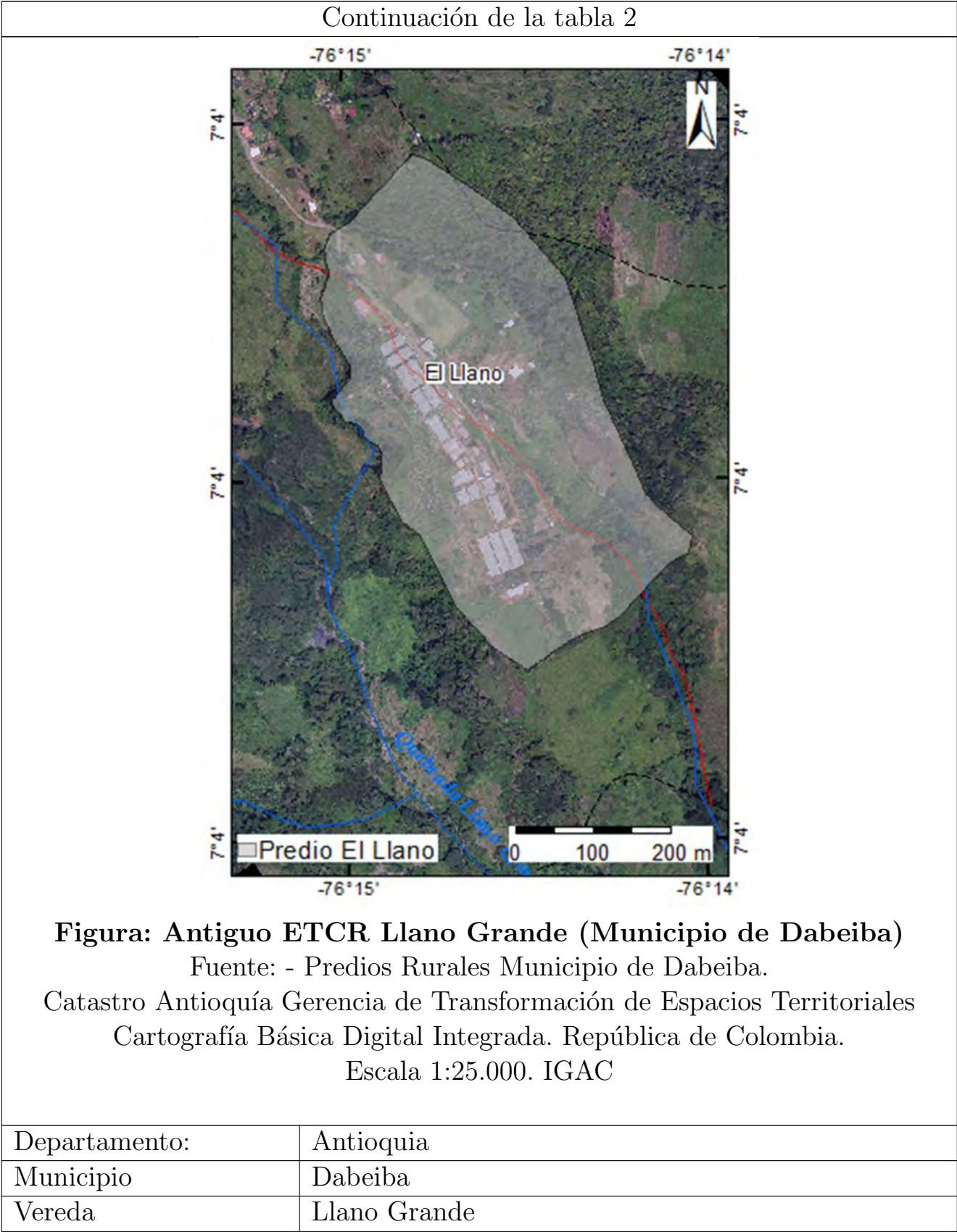
Así mismo, desde el punto de vista jurídico se presenta el estudio de tenencia del predio donde se encuentra el antiguo ETCR Llano Grande , cuyo análisis se hace a partir de la revisión de los títulos de adquisición como también del folio de matrícula inmobiliaria o certificado de tradición, a fin de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

En la Tabla 2 se presenta el estudio de títulos realizado al certificado de tradición del predio El Llano.

Tabla 2: Análisis de la propiedad al inmueble El Llano.

Análisis de la propiedad



Continuación de la tabla 2	
Nombre del Predio	El Llano
Tipo de Predio	Rural
Código Catastral	234002001000046000014
Área según catastro	17 HA + 5054 m ²
Área según título	17 HA + 5054 m ²
Folio de Matricula Inmobiliaria	007-14532
Fecha de Apertura del folio	11-08-1992
Documento y/o acto jurídico por el cual se da apertura el FMI	RESOLUCIÓN 3203 DEL 30-09-1991 INCO-RA DE MEDELLIN (Adjudicación de Baldíos)
Estado del folio	Activo
Folio Matriz	No registra
Folios segregados	Ninguno
Nombre Propietario(s)	CARMEN TULIA CARDONA TUBERQUIA C.C. 43.730.662 50 % y MARIA SALOME CARDONA TUBERQUIA C.C. 43.076.642 50 %
Naturaleza Jurídica	Privado
Linderos: Mediante Resolución 17.253 del 12 de marzo de 2020 expedida por el Departamento Administrativo de Planeación-Gerencia de Catastro de la Gobernación de Antioquia se realizó actualización de linderos y rectificación de área por imprecisa determinación, mediante la conversión y descripción técnica de los mismos. Lindero 1: (Este) con el predio identificado catastralmente con 2342001000004600013. Partiendo del punto 1 con coordenadas N=1.274.637.5019m, E=760.925,6847m en línea continua y en sentido Sureste, en una distancia de 395,6m, hasta el punto 2 de coordenadas N=1.274.341.8381m, E=761.160.0783m. Lindero 2: (Este) con el predio identificado catastralmente con 2342001000004600001. Partiendo del punto 2 con coordenadas N=1.274.341,8381m, E=761.160,0783m en línea continua y en sentido Sureste, en una distancia de 237,83m hasta el punto 3 de coordenadas N=1.274.140.4707m, E=761.276.6288m.	

Continuación de la tabla 2	
Lindero 3(SUR):	con predio identificado catastralmente con 2342001000004600001. Partiendo del punto 3 con coordenadas N=1.274.140,4707m, E=761.276,6288m en línea continua y en sentido suroeste, en una distancia de 328,34m hasta el punto 4 de coordenadas N=1.273.996.8373m, E=761.024.886m.
Lindero 4 (OESTE):	con predio identificado catastralmente 2342001000004600008. Partiendo del punto 4 con coordenadas N=1.273.996.8373m, E=761.024,886m en línea continua y en sentido Noroeste, en una distancia de 603,94m, hasta el punto 5 de coordenadas N=1.274.500.9104m, E=760.810.273m.
Lindero 5(NORTE):	con el predio identificado catastralmente con 2342001000004600015. Partiendo del punto 5 con coordenadas N=1.274.500,9104m, E= 760.810.273m en línea continua y en sentido Noreste, en una distancia de 186,16m hasta el punto 1, con el cual se cierra el polígono.
Concepto: Las actuales propietarias del inmueble son en común y proindiviso las señoras Carmen Tulia Cardona Tuberquia y María Salomé Cardona Tuberquia, quienes adquirieron el inmueble por adjudicación en la sucesión del señor Alvaro Cardona Torres, mediante Escritura Pública 134 del 26 de abril de 2018 de la Notaría Única de Dabeiba, debidamente registrada en la anotación 03 del folio de matrícula inmobiliaria. La tradición se encuentra ajustada a derecho, es consecuencia de una cadena lógica de dominio, el predio se encuentra libre de gravámenes, limitaciones al dominio, 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 007-14532 del 17-09-2020. Total anotaciones 3.	
Observaciones técnicas: El área de este predio corresponde a la delimitada por Catastro Antioquia, según Resolución Numero 17253 (12 de marzo de 2020).	

2.2.3.2. Caracterización general físico espacial

El antiguo ETCR Llano Grande alberga en la actualidad una población de 214 habitantes (según la ARN se tiene una potencial demanda de personas en

reincorporación para atención con vivienda de 122 Agencia para la Reincorporación y la Normalización (2020), ubicados en viviendas transitorias nucleadas, contrastando con los procesos de ocupación dispersa del suelo rural del municipio.

De acuerdo con lo observado en campo, el asentamiento cuenta con servicio de energía eléctrica y acueducto; en términos de espacios colectivos cuentan con salón comunal, puesto de salud, comedor y cancha. Llama la atención la consolidación de su propio cementerio, mostrando con ello dinámicas propias de un asentamiento humano con características y necesidades del suelo urbano.

Durante la conformación del asentamiento se han establecido dentro de los mismos módulos de vivienda usos diferentes como: comerciales, tiendas, panadería, taller de confecciones, ebanistería y oficinas. Esto evidencia la necesidad de construir espacios definitivos independientes a las viviendas que alberguen usos de comercio, servicio, recreacional, deportivo y educativo, lo cual ayudará en gran medida a la armonización entre los usos del suelo y a la generación de espacios colectivos.

El paisaje colindante al antiguo espacio territorial se caracteriza por estar conformado por bosque en la parte alta de la cuenca, y usos agrícolas y ganaderos de baja intensidad hacia la parte inferior de la zona.

Norma general territorial aplicable al predio: El municipio de Dabeiba cuenta con el Acuerdo 024 de diciembre 28 de 2012 “Por medio del cual se aprueba una revisión excepcional del Plan Básico de Ordenamiento Territorial del Municipio de Dabeiba” (Acuerdo 012 de Julio 09 de 2000).

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

Normas urbanísticas municipales aplicables:

Clasificación suelo: El predio se encuentra en **suelo rural** (17,48 Ha) en su totalidad (Art 154). Este a su vez define las categorías del suelo rural, que para el predio objeto de análisis corresponde con la **categoría de protección en suelo rural**. Así mismo el artículo 155 señala entre otras categorías de protección en suelo rural a las **áreas de conservación y protección ambiental**. (Figura 29).

El predio se encuentra en suelo rural (17,48 Ha) en su totalidad (Art 154). Este a su vez define las categorías del suelo rural, que para el predio objeto de

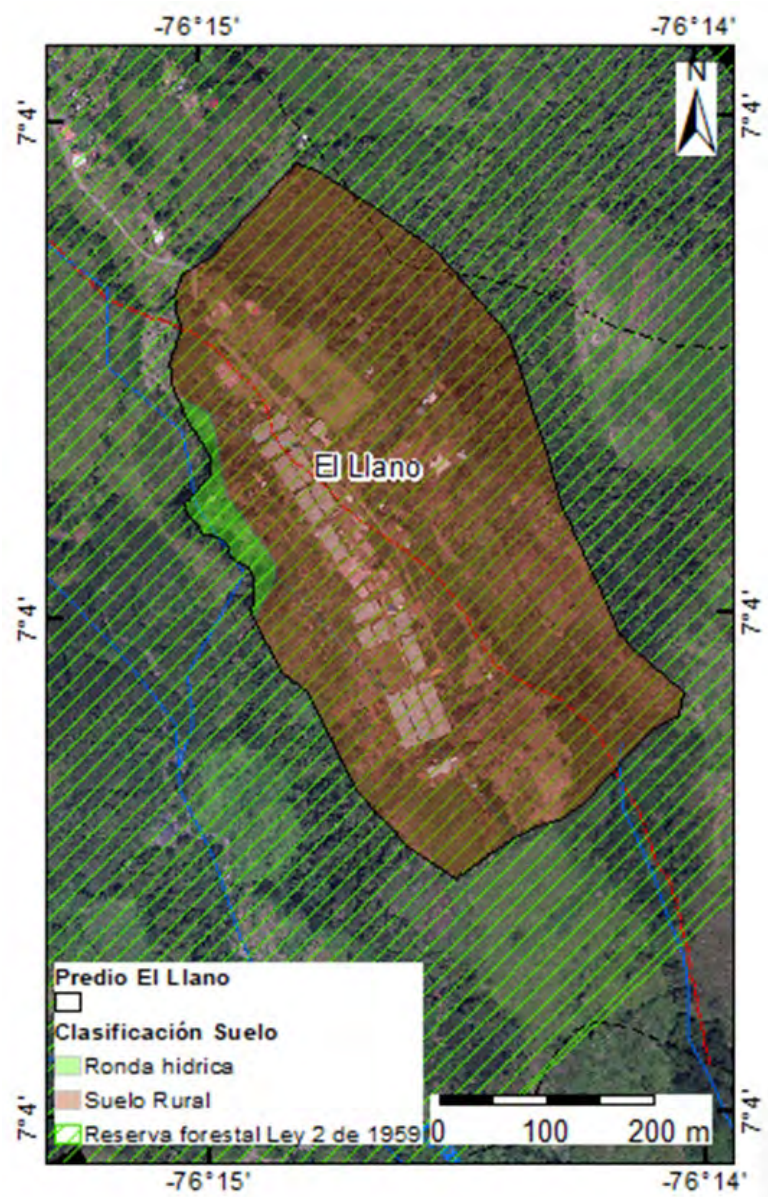


Figura 29: Clasificación Suelo antiguo ETCR Llano Grande (Municipio de Dabeiba. Fuente: Cartografía PBOT - Municipio de Dabeiba)

análisis corresponde con la categoría de protección en suelo rural. Así mismo el artículo 155 señala entre otras categorías de protección en suelo rural a las áreas de conservación y protección ambiental.

Determinantes de ordenamiento territorial.

- El PBOT considera los suelos de protección dentro del Mapa de Reserva y Protección Ambiental que para efecto del predio objeto de estudio le aplica en su totalidad La Reserva Forestal del Pacífico (Ley 2 de 1959) la

cual a su vez, según el artículo 158 hace parte de la Estructura Ecológica Principal. Sin embargo, según el artículo 159 no hace parte del sistema de áreas protegidas, pero sí de las áreas de especial importancia ecosistémica que son las que contribuyen al mantenimiento de los servicios ambientales que prestan. Dentro de esta categoría se encuentran las áreas forestales protectoras que para el caso del predio El Llano es la que le aplica desde los usos del suelo en su gran mayoría como se muestra a continuación.

- El artículo 173 determina las categorías de uso, entre otras las de uso forestal señalando que son las áreas que en la actualidad soportan este uso y aquellas que presentan aptitud potencial para este.

En el Mapa de Usos del Suelo (Figura 30) se establece para el predio El Llano bajo el Uso Principal lo siguiente:

Vocación Forestal Categoría Forestal protectora: 15,26 Ha. Fuente: PBOT

Vocación Agroforestal Categoría Agrosilvícola: 2,22 Ha. Fuente: PBOT

- El artículo 164 define las normas para el manejo de las áreas de conservación y protección ambiental (Estructura Ecológica Rural), señalando que tanto las áreas pertenecientes al SINAP como en las áreas de reserva para la conservación y protección de los recursos naturales y el medio ambiente, como en las áreas de especial importancia ecosistémica, no se permitirá la construcción de viviendas de acuerdo al estudio de densidades elaborado por CORPOURABA.

Adicionalmente establece las acciones tendientes a recuperar la estructura y funcionalidad de los elementos de la Estructura Ecológica Principal, estableciendo entre otros el manejo para los usos forestales a fin de disminuir la presión sobre dichas áreas. Su desarrollo estará condicionado así:

- El uso forestal deberá privilegiar las modalidades silvopastoriles, agroforestales y agrosilvopastoriles
- El establecimiento de plantaciones forestales estará supeditada, en lo concerniente a su localización, extensión, manejo y aprovechamiento, a los lineamientos y planes que en este sentido tenga CORPOURABA, la Secretaría del Medio Ambiente y/o la UMATA.
- Las plantaciones forestales nunca podrán reemplazar bosques nativos.
- El aprovechamiento forestal estará sujeto a los permisos correspondientes emitidos por CORPOURABA

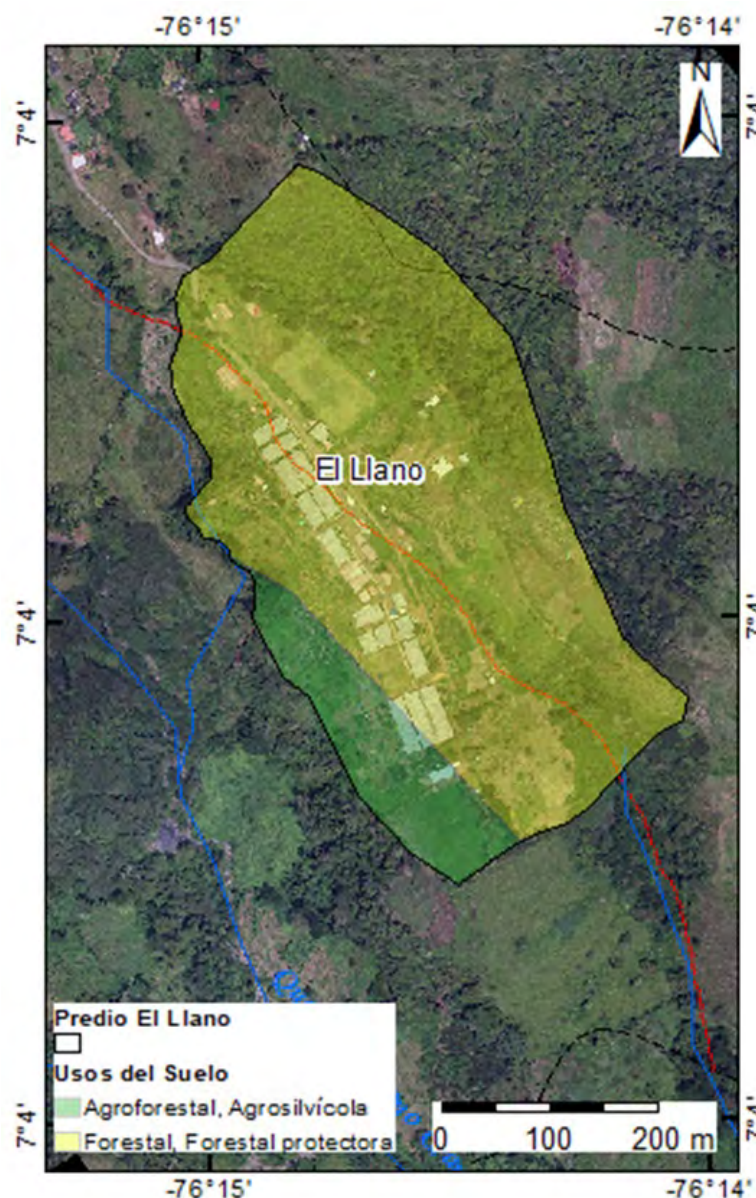


Figura 30: Usos del Suelo en el antiguo ETCR Llano Grande. Fuente: Cartografía PBOT - Municipio de Dabeiba

- En el predio objeto de estudio no aplican las áreas para vivienda campestre por tratarse de un suelo de protección (Art 200) asociado a la Reserva Forestal del Pacífico Ley 2 de 1959 indicadas en el mapa protocolizado de Reserva y Protección Ambiental.
- El artículo 202 indica las modalidades de la vivienda rural. Para el predio en cuestión podría aplicar la vivienda campesina, utilizada como unidad productiva. De todos modos es zona de reserva y está sujeta a las condi-

cionantes de CORPOURABA para las densidades y deberán estar acordes con la normatividad agraria y ambiental (Art 168).

- Amenazas: Amenaza alta (1,28 Ha)
- Resguardos: No hay traslapes con resguardos indígenas y otras comunidades étnicas
- Cuerpos de agua: Drenaje sencillo
- Retiros hídricos: Rondas hídricas (0,49 Ha)
- Líneas de alta Tensión: No presentan infraestructuras asociadas
- Vías: No se localizan vías de primer, segundo y tercer orden directamente relacionadas con el predio.

Análisis de la restricción ambiental de la Reserva Forestal del Pacífico (Ley 2 de 1959).

Por constituirse la Reserva Forestal del Pacífico una Determinante Ambiental de superior jerarquía en los términos del artículo 10 de la Ley 388 de 1997, se desarrolla a continuación un breve análisis sobre la misma y como incide en el predio El Llano del municipio de Dabeiba.

- La Ley 2 de 1959 sobre Economía Forestal de la Nación y Conservación de Recursos Naturales Renovables, señaló el artículo 1º lo siguiente:

“Para el desarrollo de la economía forestal y protección de los suelos, las aguas y la vida silvestre, se establecen con carácter de ”Zonas Forestales Protectoras” ”bosques de Interés General”, según la clasificación de que trata el Decreto legislativo número 2278 de 1953, las siguientes zonas de reserva forestal, comprendidas dentro de los límites que para cada bosque nacional se fijan a continuación:

1. Zona de Reserva Forestal del Pacífico, comprendida dentro de los siguientes límites generales:

Por el Sur la línea de frontera con la república del Ecuador; por el Occidente, el Océano Pacífico y la línea divisoria con la República de Panamá; por el Norte, el Océano Atlántico (Golfo de Urabá); y por el Oriente, una línea que arrancando 15 kilómetros al Este del divorcio de aguas de la Cordillera Occidental, en los límites con el ecuador, sigue

hasta el Volcán de chiles, el Nevado de Cumbal y la quebrada de San Pedro, y de allí, a través del río Patía, hasta Chita, continuando 15 kilómetros al Este, por el divorcio de aguas del Cerro Rivas al Cerro de Munchique y siguiendo la cima de la Cordillera Occidental hasta el cerro de Caramanta, de allí al Cerro Paramillo y luego al Cerro Murucucú, y de allí una línea recta, con rumbo 45 grados Noreste, hasta el Océano Atlántico;

2. Zona de reserva forestal central, comprendida dentro de los siguientes límites generales: una zona de 15 kilómetros hacia el lado Oeste, otra 15 kilómetro otra, 15 kilómetros hacia el este del divorcio de aguas de la Cordillera Central, desde Cerro Bordoncillo, aproximadamente a 20 kilómetros al Este de Pasto, hasta el Cerro de los Prados al Norte de Sonsón;
3. Zona de Reserva Forestal de la Sierra Nevada de Santa Marta, comprendida dentro de los siguientes límites generales:
Del Mar Caribe hacia el Sur, siguiendo la longitud 74 grados hasta la latitud Norte 10 grados 15 minutos; de allí hacia el Este, hasta la longitud 73 grados 30 minutos, de allí hacia el norte, hasta la latitud norte 10 grados 30 minutos; de allí hacia el Este, hasta la longitud 73 grados 15 minutos; de allí hacia el Norte hasta el Mar Caribe, y de allí por la costa, hasta el punto de partida;
4. Zona de Reserva Forestal de la Serranía de los Motilones, comprendida dentro de los siguientes Límites generales:
Por el oriente, la línea de frontera con la República de Venezuela, por el Norte, partiendo de la frontera con Venezuela, se sigue una distancia de 20 kilómetros por el límite del Departamento del Magdalena con la Intendencia de la Guajira; por el Occidente, una línea paralela a 20 kilómetros al Oeste de la Frontera entre Colombia y Venezuela, desde el límite Norte descrito arriba hasta la intersección de esta paralela con la longitud 73 grados 30 minutos, y de allí continúa hacia el Sur hasta su intersección con latitud Norte 8 grados treinta minutos, y de allí continúa hacia el Sur, siguiendo este paralelo, hasta encontrar la frontera con Venezuela;
5. Zona de Reserva Forestal del Cocuy, comprendida dentro de los siguientes límites generales:

Desde un punto en el límite entre Colombia y Venezuela en la longitud Occidental 71 grados y 45 minutos; hacia el Sur, hasta la latitud Norte seis grados y 15 minutos; y de allí hacia el Oeste hasta la longitud Occidental 72 grados y 30 minutos; de allí hacia el Este, siguiendo la Frontera de Colombia y Venezuela hasta el punto de partida;

6. Zona de Reserva Forestal de la Amazonía, comprendida dentro de los siguientes límites generales:

Partiendo de Santa Rosa de Sucumbió, en la frontera con el Ecuador , rumbo Noreste hasta el Cerro más alto de los Picos de la fragua; de allí siguiendo una línea de 20 kilómetros al Oeste de la Cordillera Oriental hasta el alto de las Oseras; de allí en línea recta, por su distancia más corta, al río Ariari, y por éste hasta su confluencia con el río Guayabero o el Guaviare, por el cual se sigue aguas abajo hasta su desembocadura en el Orinoco: luego se sigue la frontera con Venezuela y el Brasil hasta encontrar el río Amazonas, siguiendo la frontera Sur del país hasta el punto de partida.”

Para el caso del Municipio de Dabeiba, su territorio quedó comprendido dentro de la Reserva Forestal del Pacífico. Esta zona fue objeto de sustracción mediante Acuerdo 036 de 1983 expedida por el Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente, INDERENA.

Por su parte, la Dirección de Bosques, Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS, para estas zonas desarrolló los procesos de zonificación y ordenamiento, con el propósito de establecer los lineamientos generales para orientar los procesos de ordenación ambiental al interior de estas áreas, sirviendo como insumo planificador y orientador en materia ambiental para los diferentes sectores productivos del país, sin generar cambios en el uso del suelo, ni en la naturaleza misma de la Reserva Forestal. La zonificación definió tres tipos de zonas:

ZONA A. Zonas que garantizan el mantenimiento de los procesos ecológicos básicos necesarios para asegurar la oferta de servicios ecosistémicos, relacionados principalmente con la regulación hídrica y climática; la asimilación de contaminantes del aire y del agua; la formación y protección del suelo; la protección de paisajes singulares y de patrimonio cultural; y el soporte a la diversidad biológica.

ZONA B. Zonas que se caracterizan por tener coberturas favorables para un manejo sostenible del recurso forestal mediante un enfoque de ordenación forestal integral y la gestión integral de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

ZONA C. Zonas que por sus características biofísicas ofrecen condiciones para el desarrollo de actividades productivas agroforestales, silvopastoriles y otras compatibles con los objetivos de la Reserva Forestal, que deben incorporar el componente forestal, y que no impliquen la reducción de las áreas de bosque natural presentes en sus diferentes estados sucesionales.

La adopción de la zonificación y ordenamiento ambiental de estas zonas por parte del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADA se efectuó mediante las resoluciones descritas en la Tabla 3:

Tabla 3: Zonas de Reserva y Resoluciones de adopción

ZONAS DE RESERVA FORESTAL	RESOLUCIÓN QUE ADOPTA LA ZONIFICACIÓN
COCUY	1275 del 06 de agosto de 2014
SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA	1276 del 06 de agosto de 2014
CENTRAL	1922 del 27 de diciembre de 2013
SERRANIA DE LOS MOTILONES	1923 del 27 de diciembre de 2013
RIO MAGDALENA	1924 del 30 de diciembre de 2013
PACIFICO	1926 del 30 de diciembre de 2013
AMAZONIA (Amazonas, Cauca, Guainía, Putumayo y Vaupés)	1277 del 06 de agosto de 2014
AMAZONIA (Caquetá, Guaviare y Huila)	1925 del 30 de diciembre de 2013

El artículo 6° de la Resolución 1926 del 2013 estableció el ordenamiento específico de cada una de las zonas, regulando para la **Zona A** lo siguiente:

1. Fomentar la investigación científica aplicada prioritariamente a la restauración ecológica y a la generación de información sobre la diversidad biológica y los servicios ecosistémicos, de acuerdo a la normatividad vigente.
2. Fomentar la investigación básica sobre biodiversidad, y manejo forestal sostenible.

3. Implementar las acciones de restauración, rehabilitación y recuperación en procura del restablecimiento del estado natural de las coberturas y de las condiciones ambientales necesarias para regular la oferta de servicios ecosistémicos.
4. Incentivar la reconversión de la producción agrícola y pecuaria existentes hacia esquemas de producción sostenibles, que sean compatibles con las características biofísicas de este tipo de zona.
5. Implementar el certificado de Incentivo Forestal con fines de conservación, establecido en la Ley 139 de 1994 y el parágrafo del artículo 250 de la Ley 223 de 1995.
6. Desarrollar actividades de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación –REDD, otros mecanismos de mercado de carbono y otros esquemas de distribución de beneficios por servicios ecosistémicos.
7. Incentivar el aprovechamiento sostenible de fauna, la agricultura ecológica y la Biotecnología según las normas vigentes.
8. Impulsar las líneas establecidas en la Estrategia de Emprendimiento de negocios verdes, incluida en la Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible y los programas que lo implementen, como el ecoturismo, siempre y cuando sean compatibles con las aptitudes del suelo y las características de este tipo de zona.

Conforme a lo anterior, el predio El Llano del municipio de Dabeiba se encuentra afectado por la Reserva Forestal del Pacífico, dentro de la **Zona A**. Vale la pena anotar que dicha afectación será objeto de precisión más adelante, con el fin de esclarecer si la misma es total o parcial, de acuerdo con los resultados del presente estudio.

■ **Georeferenciación de la Reserva Forestal del Pacífico en relación al predio El Llano.**

La georeferenciación de la Reserva Forestal del Pacífico en relación al predio El Llano se realizó cumpliendo los siguientes pasos:

- Se consultó directamente en el SIAC (Figuras 31 y 32) según lo establecido en el artículo 9 de la Resolución 1926 de 2013 en relación con la información del REAA (Registro Único de Ecosistemas y Áreas Ambientales) y se verificó que en el predio El Llano ubicado en el municipio de Dabeiba, si existe una restricción por Registro de Ecosistemas

y Áreas Ambientales, encontrando coincidencia con la información del SIG-OT (Figuras 31 y 32).

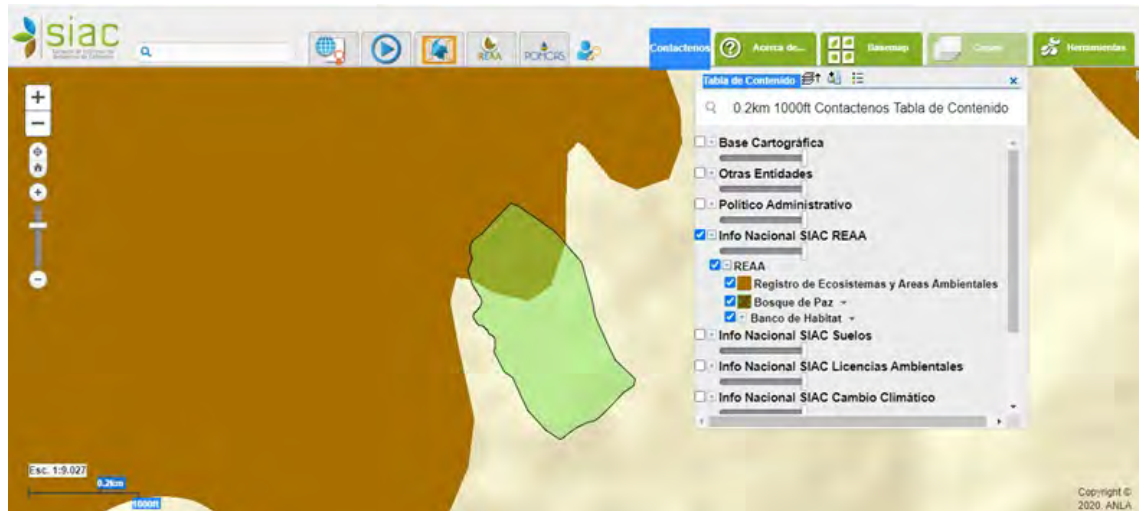


Figura 31: Reserva Forestal del Pacífico en el SIAC



Figura 32: Reserva Forestal del Pacífico en el SIAC SIG-OT IGAC

- En el portal del SIAC se realizó la consulta sobre la interceptación de un área de interés con los ecosistemas y áreas incluidas en el REAA a nivel nacional y se descargó del mismo portal la siguiente información en formato shape (ver Tabla 4):
- Finalmente se identificó que las Áreas de Sustracciones Definitivas corresponden a las establecidas por el Acuerdo 36 de 1982, que

Tabla 4: Información SIAC

Nombre	Descripción	Formato / Tamaño
Reservas Forestales Ley 2ª Límite Actual	Zonas Forestales Protectoras y Bosques de Interés General. Escala 1:100.00 realizada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS. Actualización periódica según modificaciones a la capa.	Shapefile comprimido .ZIP / 8996 KB
Reservas Forestales Ley 2ª Límite Original	Límite original de las áreas constituidas como Reserva de Ley 2ª. Escala 1:100.000 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS. Año 2012	Shapefile comprimido .ZIP / 1688 KB
Reservas Forestales Ley 2ª Sustracciones	Límite de sustracciones realizadas a las áreas constituidas como Reserva de Ley 2ª. Escala 1:100.000 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS. Actualización periódica según modificaciones a la capa.	Shapefile comprimido .ZIP / 10419 KB

hace referencia a la sustracción realizada por el INDERENA de la Reserva del Pacífico, para terrenos baldíos de los municipios de: Río Sucio, Dabeida y Uramita del Departamento de Antioquia.

- **Precisión de la Reserva Forestal del Pacífico frente a su georeferenciación cartográfica.**

A partir del estudio de las diferentes fuentes cartográficas consultadas, se puede concluir que el PBOT del municipio de Dabeiba en el Acuerdo 024 de 2012 al incorporar la información técnica asociada a la Reserva Forestal del Pacífico, en el Mapa 03 de Reserva y Protección Ambiental (Figura 33), tuvo en cuenta como fuente el Decreto 2811 de 1974 Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección del Medio Ambiente, la cual no refleja la sustracción de áreas de Reserva de Ley 2ª de 1959, efectuada por el INDERENA mediante Acuerdo 36 de 1982, ocasionando que gran parte del territorio municipal de Dabeiba se encuentre catalogado como suelo de protección bajo la categoría de Reserva Forestal del Pacífico. Sin embargo, al revisar las actualizacio-

nes periódicas de las sustracciones de áreas de reserva que efectúan el SIG-OT IGAC y el SIAC, se evidencia que el Mapa 03 adoptado por el PBOT donde se localizan los suelos de protección asociados a la Reserva Forestal del Pacífico, debe ser actualizado acogiendo la sustracción efectuada a esta reserva, (Figuras 33 y 34).

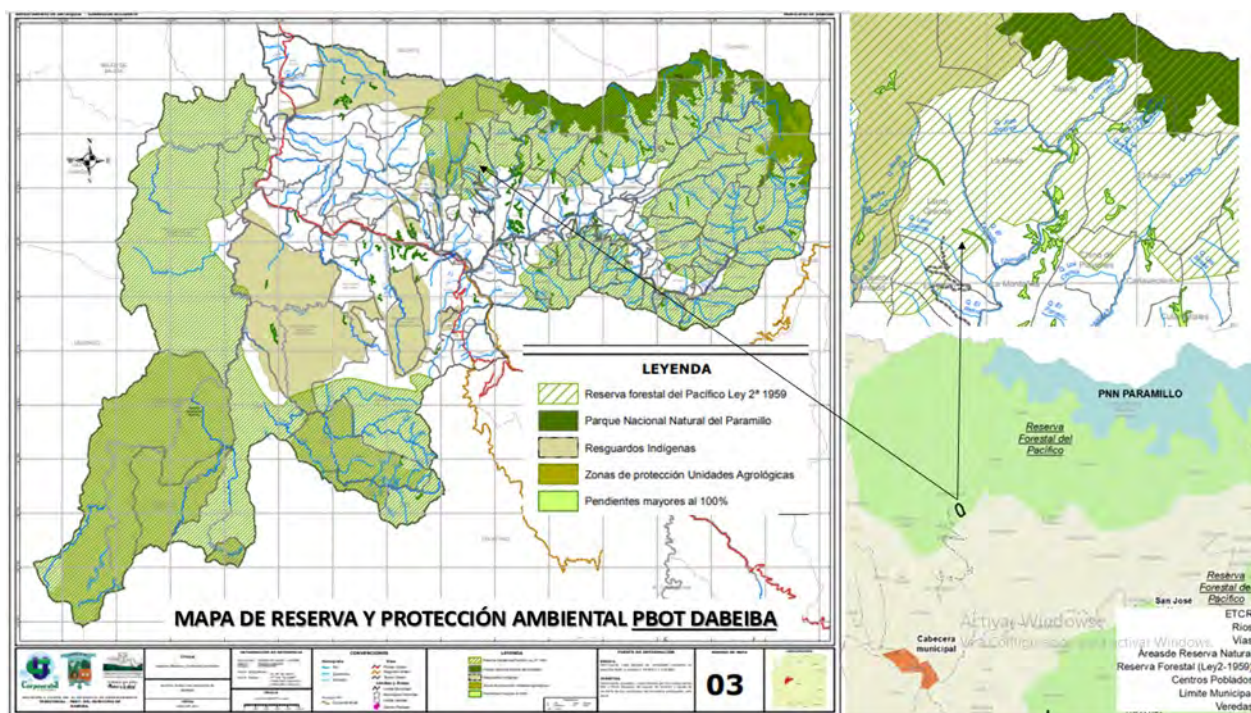


Figura 33: Ubicación del predio El Llano en el Mapa 03 PBOT

Esta inconsistencia cartográfica de orden municipal, producto de las fuentes utilizadas, incide sobre el predio El Llano al afectarlo totalmente como suelo de protección por cuanto de acuerdo con las fuentes oficiales reseñadas, su afectación es solo parcial.

Por lo tanto, el municipio debe proceder a realizar la corrección cartográfica acogiendo lo dispuesto por el parágrafo tercero del artículo 12 de la Ley 388 de 1997 adicionado por el artículo 190 del Decreto Ley 019 de 2012 que señala lo siguiente:

”Parágrafo 3. Cuando existan inconsistencias entre lo señalado en el acuerdo que adopta el plan de ordenamiento territorial y su cartografía oficial, prevalecerá lo establecido en el texto del acuerdo y corresponderá al alcalde municipal o distrital, o la entidad delegada para el efecto, corregir las inconsistencias cartográficas, siempre que no impliquen

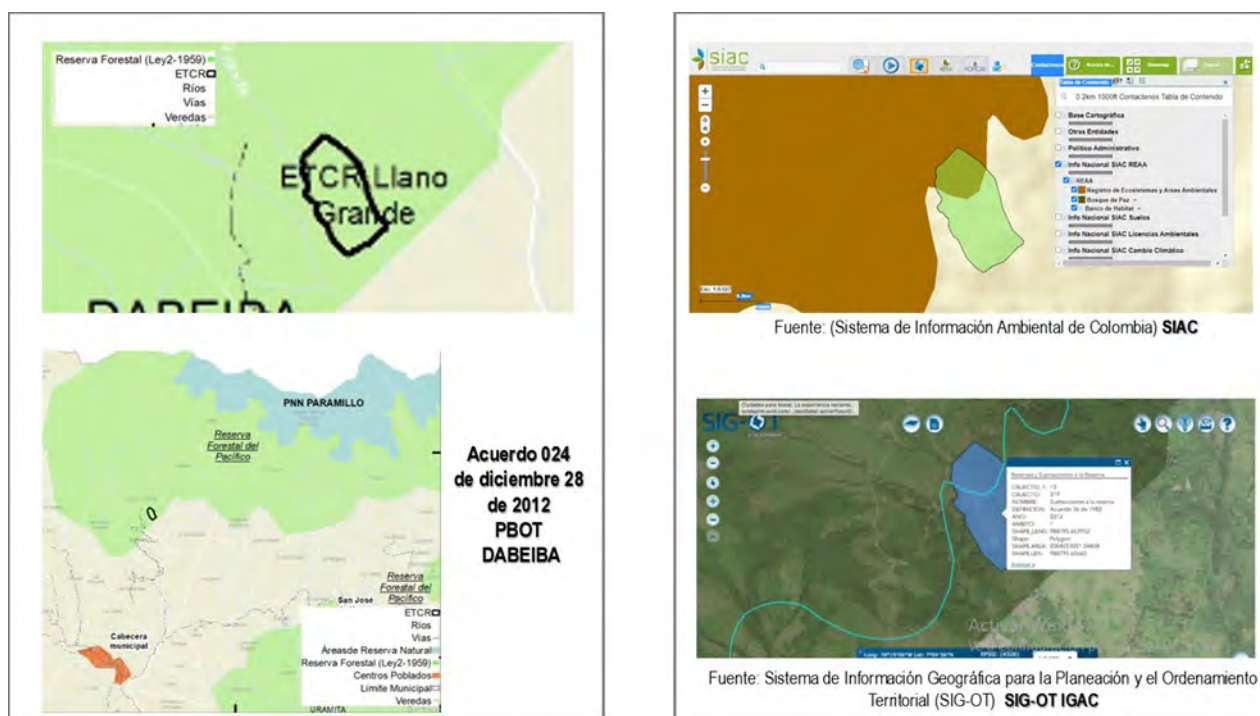


Figura 34: : Imprecisión cartográfica Mapa 03 PBOT vs Fuentes oficiales Sistema de Información Geográfico (SIG-OT IGAC y el SIAC)

modificación al articulado del Plan de Ordenamiento Territorial.

En el acto administrativo que realice la precisión cartográfica se definirán, con fundamento en las disposiciones del Plan de Ordenamiento Territorial y sus reglamentaciones, las normas urbanísticas aplicables al área objeto de la precisión. Una vez expedido el acto administrativo, el mismo deberá ser registrado en todos los planos de la cartografía oficial del correspondiente plan y sus instrumentos reglamentarios y complementarios. Esta disposición también será aplicable para precisar la cartografía oficial cuando los estudios de detalle permitan determinar con mayor exactitud las condiciones jurídicas, físicas, geológicas y morfológicas de los terrenos.”

De acuerdo con lo anterior, al Alcalde Municipal de Dabeiba le corresponderá adoptar mediante Decreto el ajuste cartográfico en los términos del citado artículo, de modo que el predio El Llano en el Mapa 03 de Reserva y Protección Ambiental quede afectado solo parcialmente con suelo de protección ambiental y el resto en suelo rural, sin ningún otro tipo de afectación ambiental. Como consecuencia de dicho ajuste, los usos del suelo para las áreas desafectadas como suelo de protección am-

biental recobraran su condición de ser suelos rurales con categoría de producción y con uso agroforestal de acuerdo a la norma urbanística establecida en el PBOT.

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 la cual es la resultante de descontar del área bruta del predio, las áreas para la localización de la infraestructura para el sistema vial principal y de transporte, las redes primarias de servicios públicos, las áreas de conservación y protección de los recursos naturales y paisajísticos y demás afectaciones del predio, multiplicado por la densidad habitacional definida por el PBOT.

En la Figura 35 que se presenta a continuación se muestran las áreas no urbanizables del predio, las cuales están asociadas a la afectación de la Reserva Forestal del Pacífico como suelos de protección del municipio, condicionando con esto toda la intervención urbanística y permitiendo solo actuaciones dirigidas a la conservación ambiental. Por lo que se concluye que en el predio El Llano de acuerdo al cruce de variables del PBOT existe un porcentaje menor de áreas urbanizables las cuales mantendrían su uso agroforestal con su correspondiente densidad. .

Aunado a lo anterior, el municipio de Dabeiba no establece en su PBOT densidades habitacionales para el suelo rural y tampoco existe reglamentación del Numeral 31, Artículo 31 de la ley 99 de 1993 por parte de la CAR, motivo por el cual se acude a la definición de la UAF reglamentada a través de Resolución 041 de 1996 del INCORA para el municipio, la cual está entre 6ha-8ha por parcela con una sola vivienda, es decir una densidad habitacional de 0,17 viv/ha.

En la Tabla 5 se presentan los resultados que arroja el cálculo de densidades sobre el predio El Llano luego de aplicarle las normas anteriormente descritas y antes de ser realizado el proceso de corrección cartográfica por parte del alcalde de Dabeiba, lo cual se espera sea realizado a finales de diciembre de 2020:

Tabla 5: Cálculo de aprovechamientos para predio El Llano.

Resultados Obtenidos	
INFORMACIÓN PREDIAL	DABEIBA

Nombre del predio	El Llano
Vereda (Fuente: PBOT)	Llano Grande
Área jurídica (Fuente: Matricula Inmobiliaria)	17 Ha + 5054 m ²
Área Dibujo	17,48 ha
Matricula Inmobiliaria	007-14532
Propietario	Carmen Tulia Cardona Tuberquia / Maria Salomé Cardona Tuberquia
Intensidades de usos según norma urbanística	
Densidades	
Para parcelación y construcción rural	No considera las densidades rurales en POT. Densidades no reglamentadas por Corporurabá. Aplicación residual densidad in-coder: Uaf de 1viv/6ha-8ha
Número Máximo de viviendas Por Ha (densidad)	0,166666667
Dispersas	NA
Agrupadas	NA
Dispersas	NA
Agrupadas	NA
Vivienda Campestre	NA
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

CÁLCULO DE APROVECHAMIENTOS	
Área de lote (ha)	17,48
Área no urbanizable (restricciones)	15,32
Área neta urbanizable	2,16
Total aprovechamiento máximo (viviendas)	0,36

De acuerdo a estos resultados y de cara a la viabilización del proyecto de vivienda del antiguo ETCR Llano Grande en el predio objeto de estudio, donde con la norma urbanística vigente el aprovechamiento máximo es de 0.36 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,

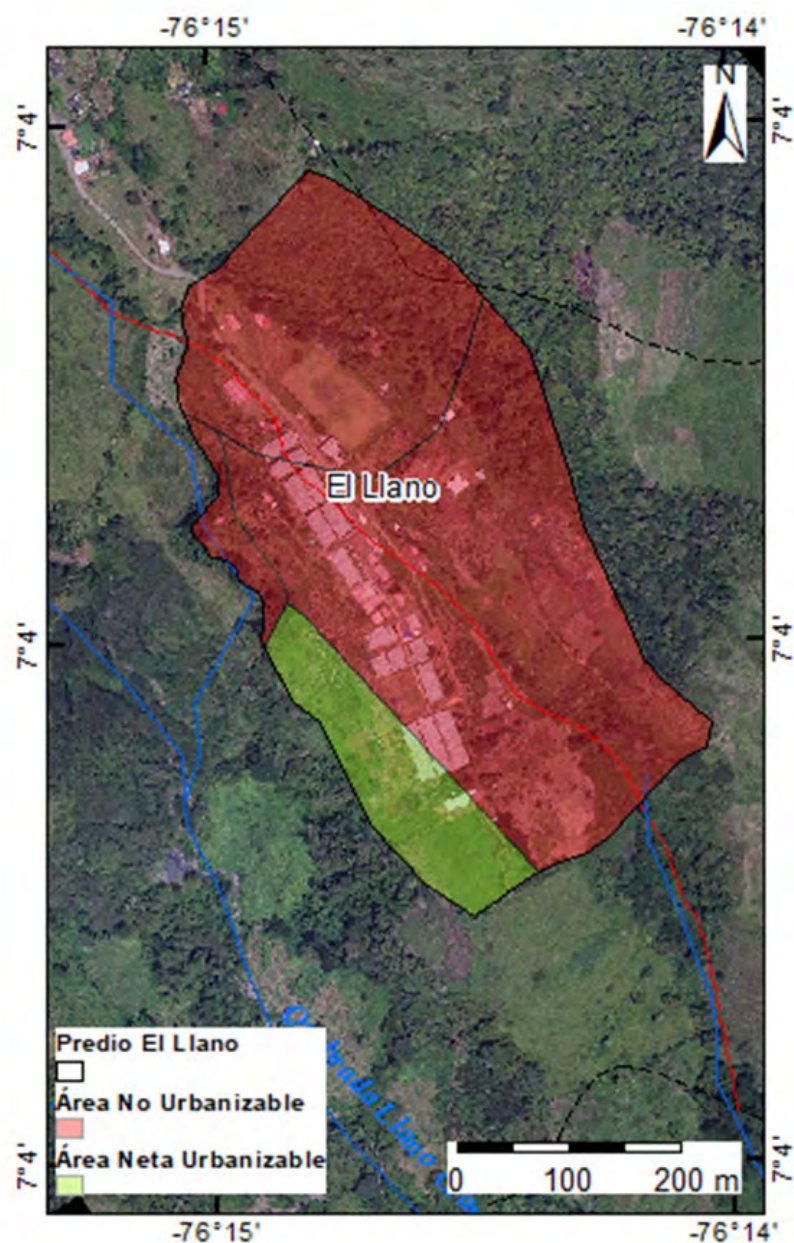


Figura 35: Área No Urbanizable antiguo ETCR Llano Grande. Fuente: Cartografía PBOT - Municipio de Dabeiba)

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 antiguo 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 posibiliten 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 Dabeiba:

- En primer lugar, es preciso viabilizar el predio El Llano desde el punto de vista ambiental a partir de un ajuste cartográfico para incorporar la sustracción de áreas de que fue objeto la Reserva Forestal del Pacífico, y que el Alcalde municipal deberá realizar mediante Decreto acogiendo lo dispuesto en el artículo 190 del Decreto Ley 019 de 2012, cuyos argumentos técnicos se dejaron consignados en el acápite correspondiente del presente estudio.
- El municipio en su Plan de Desarrollo 2020- 2023 Unidos por Dabeiba (Acuerdo 005 de 2020) contempla en sus Líneas estratégicas 3 y 4 la necesidad de actualizar el PBOT, por lo tanto esto permitirá efectuar la apropiación presupuestal de forma ágil de cara a la contratación de todos los estudios técnicos y el equipo profesional que se requiera. Así mismo se señala de manera específica en sus objetivos “Gestionar con las entidades correspondientes una vez realizada la actualización catastral y el PBOT, la nueva figura de corregimiento para la vereda Llanogrande y el hoy antiguo ETCR Llano Grande Chimiadó”.
- 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 PBOT, 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 PBOT 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 PBOT 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 antiguo espacio territorial.

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

Tabla 6: : Propuesta general de modificación e incorporación de artículos revisión PBOT.

ITEM	Disposición Principal Propuesta	Localización En el ajuste al PBOT	Observación
Clasificación del suelo	Clase de suelo rural	Art 22. Sin cambios	Disposición objeto de concertación ambiental y Adopción mediante Acuerdo POT
Categoría del suelo rural	Suelo suburbano	Adicionar contenido al Art 183	Disposición objeto de concertación ambiental y Adopción mediante Acuerdo POT
Umbral de suburbanización	Incrementar el indicador existente	Modificar el Art 184	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
Normas de Parcelación			
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	Ajustar Art 195	Adopción mediante Acuerdo POT
Uso del suelo principal	Vivienda (30 % ANU) Agrícola (30 % ANU)	Ajustar Art 193	Adopción mediante Acuerdo POT
Usos del suelo complementarios	Comercio menor Usos dotacionales (20 %ANU)	Ajustar Art 193	Adopción mediante Acuerdo POT
Antejardín	4m de ancho		Adopción mediante Acuerdo POT

Densidades habitacionales	15 viv/ha	Ajustar Art 185	Disposición objeto de concertación ambiental y Adopción mediante Acuerdo POT
Área mínima de lote	500m ²	Disposición nueva después del Art 185	Adopción mediante Acuerdo POT
Frente mínimo de lote	20m	Adicionar disposición en Art 185	Adopción mediante Acuerdo POT
Índice máximo de Ocupación	30 % ANU	Ajustar Art 186	Adopción mediante Acuerdo POT
Normas de construcción			
Área mínima de vivienda	45m ²	Disposición nueva después del Art 202	Adopción mediante Acuerdo POT
Área máxima de local	250m ²	Disposición nueva después del Art 199	Adopción mediante Acuerdo POT
Altura máxima de la edificación	2 pisos	Disposición nueva después del Art 199	Adopción mediante Acuerdo POT
Retiro de edificación a lindero	5 metros	Ajustar disposiciones de art 196	Adopción mediante Acuerdo POT

Iluminación y ventilación	Todos los espacios con iluminación directa a través de fachada o patio	Disposición nueva después del Art 199	Adopción mediante Acuerdo POT
Condiciones mínimas de habitabilidad	Un baño, cocina, salón común, ventanas, puerta de baño, puerta principal, piso en mortero	Disposición nueva después del Art 199	Adopción mediante Acuerdo POT

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

■ **Justificación de la creación de un nuevo Centro Poblado Rural:**

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

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

Bajo esa premisa el Centro Poblado toma relevancia y se convierte en la figura que permite visualizar los antiguos ETCR como espacios permanen-

tes y de oportunidad para configurar físicamente asentamientos humanos nucleados con una mirada desde la planificación territorial, donde exista la posibilidad de definir el lugar que se ocupará y cómo se intervendrá de acuerdo al perfil sociocultural de los futuros habitantes, garantizando que desde su adopción o viabilización urbanística se asegure un desarrollo planificado desde lo físico, ambiental y funcional.

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

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

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

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

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

Lo anterior es básico para garantizar la permanencia del nuevo centro poblado en el tiempo, cuando sus pobladores dependan de su ingenio, capacidad social y económica para habitar en las mejores condiciones posibles.

A partir de la norma de creación de los antiguos ETCR inicialmente con vocación de transitoriedad y posteriormente de permanencia, se estableció que estuvieran ubicados en suelo rural; sin embargo, como las normas urbanísticas aplicables al suelo rural son restrictivas para el desarrollo de usos con características urbanas, se deben explorar otras posibilidades de suelos que habiliten una mayor densidad y diversidad de usos sin ir en detrimento de las condiciones ambientales de las zonas donde se ubiquen estos antiguo 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 antiguo 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 Llano Grande.

De acuerdo con lo anterior, a modo de ejemplo y sustento para la concertación de densidades con la CAR, se tomó como criterio la densidad del Centro Poblado – Chiniadó Llano Grande (Figura 36) por estar más cercano y de escala similar a la que se tiene previsto se convertirá el antiguo ETCR Llano Grande en el corto plazo.

Para este ejercicio se acogió la información Dane del Censo Nacional de Población y Vivienda-CNPV 2018: Área zona urbana (centro poblado), viviendas, hogares y personas (ver Tabla 7).

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



Figura 36: Centro Poblado de referencia Chimiadó (Dabeiba)

densidades existentes partiendo de la hipótesis que el área del polígono es totalmente urbanizable, (ver Tabla 8):

De acuerdo con el PBOT del municipio de Dabeiba en el predio El Llano, podría aumentarse el área neta urbanizable una vez se surta el proceso de ajuste cartográfico del Mapa 03 del PBOT como se dejó dicho en el acápite correspondiente. No obstante dicha corrección, la densidad habitacional deberá ajustarse previa recategorización del predio como suelo de desarrollo restringido en los términos del Decreto Único 1077 de 2015.

En las siguientes figuras se muestran las áreas urbanizables y no urbanizables (Figura 37); la primera corresponde a la información construida a partir de la información del PBOT donde el predio arroja que tiene un gran porcentaje de área no urbanizable. Y la segunda figura muestra la resultante, en el escenario hipotético de la actualización cartográfica, donde los suelos de protección al ser corregidos pasarían a ser suelos rurales urbanizables,

De acuerdo a lo anterior y tomando la información del segundo escenario en el cual se cuenta hipotéticamente con áreas urbanizables, se hará el cálculo de cuantas viviendas es posible localizar tomando como base la densidad del Centro Poblado de Referencia Chimiadó Llano Grande del municipio

Tabla 7: Densidad del centro poblado Chimiadó - Llano Grande

AETCR	MUNICIPIO	NOMCPOB	DATOSANM	AREA	STVIVIENDA	TPS16HOG	STP27PERS
DABEIBA	DABEIBA	CHIMIADO - LLANO GRANDE	ZONA URBANA (CENTRO POBLADO)	13905,20505	21	17	55

CONVENCIONES TABLA:

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

MAGNAColombiaBogotá)

STVIVIENDA: Conteo de viviendas

TSP16HOG: Conteo de hogares

STP27PERS: Número de personas

Tabla 8: Cálculo de densidad del Centro Poblado de referencia

Variables	Unidades	Dabeiba
Nombre Centro Poblado referente		Chimiadó Llano Grande
Área aproximada del centro poblado	ha	1,3905
Cantidad aproximada de viviendas	viv	21
Densidad habitacional referente	viv/ha	15,10

de Dabeiba.

Por lo tanto, al aplicar la densidad de 15,10 Viv/Ha del Centro Poblado de referencia Chimiadó Llano Grande en el área neta urbanizable (propuesta) que corresponde a 11,95 Ha, en el predio en cuestión se podrían construir un total de 180,4 viviendas.

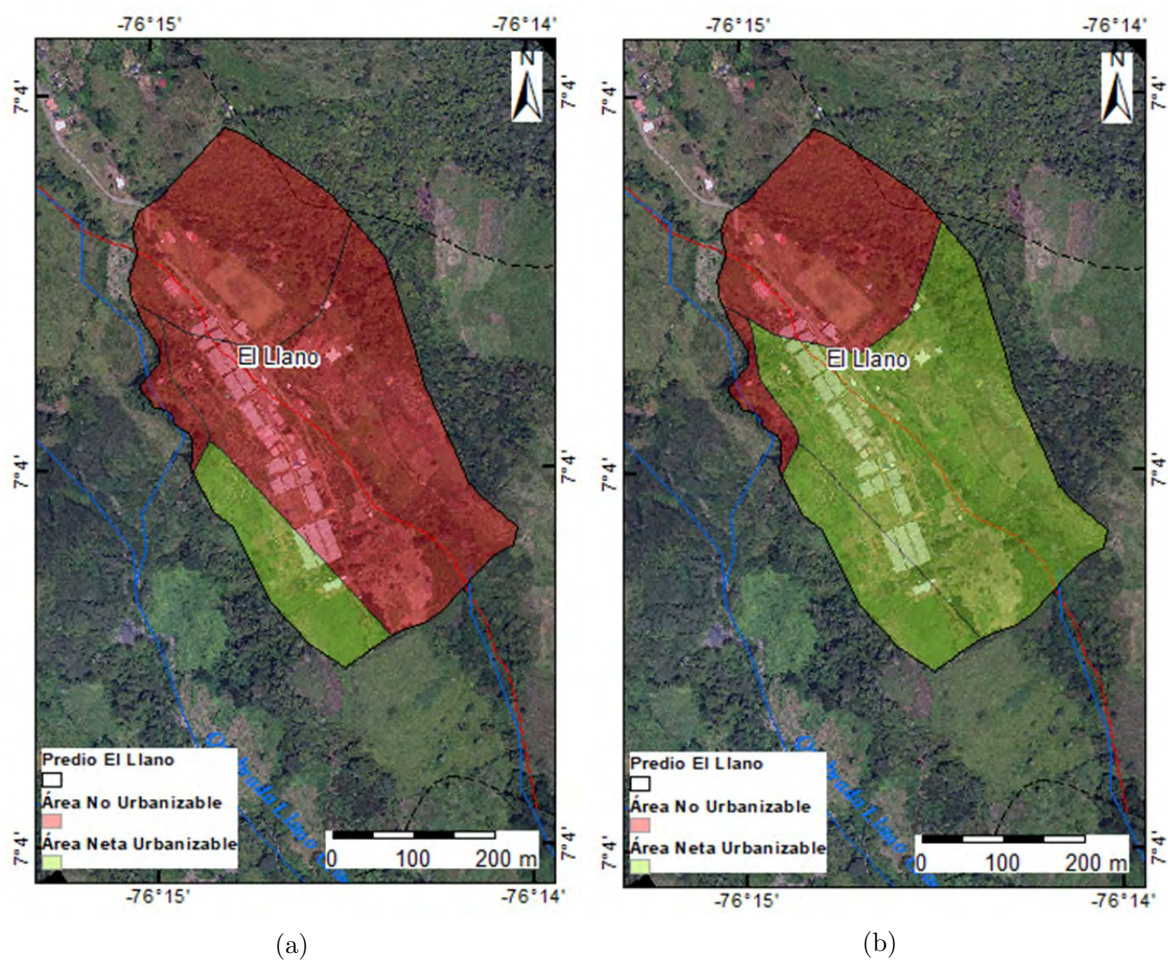


Figura 37: (a) Área No Urbanizable antiguo ETCR Llano Grande bajo insumos PBOT. (b) Áreas urbanizables y no urbanizables proyectadas según ajuste cartográfico. Fuente: Cartografía PBOT - Municipio de Dabeiba
Cartografía Básica Digital Integrada. República de Colombia. Escala 1:25.000. IGAC

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_llano_grande.aspx
- Consejo de Estado. (2013). *El plan de ordenamiento territorial (POT) de Bogotá D.C. vigencia del POT. Procedimiento de modificación excepcional de las normas urbanísticas del POT. Competencias del Concejo Distrital y del alcalde mayor para adoptar y modificar el POT*. Descargado de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=64954>
- Procuraduría General de la Nación. (2013). *Proceso de revisión y ajuste de planes de ordenamiento territorial*. Descargado de <https://ww2.camacolcundinamarca.co/documentos/Conceptos-juridico/9.pdf>

Parte II

Viabilidad Sanitaria

Capítulo 3

Viabilidad Sanitaria

Introducción

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

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

3.1. Variables del diseño

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

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

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

3.2. Normatividad

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

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

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

3.3. Proyección poblacional

Actualmente, se establece una cantidad total de 214 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 214 viviendas que componen el antiguo ETCR Llano Grande 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).

3.3.1. Modelo de proyección de población

Para proyectar la población en la zona de actuación de un proyecto de saneamiento básico se tienen diferentes modelos de proyección especificados en el RAS 2000 (de Desarrollo Económico, 2000), pero debido a la falta de información sobre censos en el antiguo espacio territorial Llano Grande 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 642 habitantes (214 viviendas cada una con 3 habitantes) y una proyección planeada al año 2046, se encuentra

un valor de población futura de **731** habitantes en el antiguo ETCR (Ver Tabla 9).

Tabla 9: Proyección poblacional para los años establecidos en el periodo de diseño

PROYECCIÓN POBLACIONAL (Hab)	
Año	Geométrico
2020	642
2021	645
2022	648
2023	652
2024	655
2025	658
2026	662
2027	665
2028	668
2029	671
2030	675
2031	678
2032	682
2033	685
2034	688
2035	692
2036	695
2037	699
2038	702
2039	706
2040	709
2041	713
2042	716
2043	720
2044	724
2045	727
2046	731

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

3.4. Caudales de diseño

Para la estimación de los caudales de diseño de los sistemas de acueducto y saneamiento básico del antiguo ETCR Llano Grande, 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 Económico, 2000).

3.4.1. Dotación de agua

Para la dotación de agua se determina la dotación bruta (d_{bruta}), y para esta intervienen dos variables importantes: la dotación neta (d_{neta}) y las pérdidas en el sistema ($\%P$). El RAS 2000 (de Desarrollo Económico, 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 120 litros/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 10: 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
Total	100 %	120,00

Tomando en cuenta lo anterior y con base en los lineamientos planteados por la resolución 0844 de 2018 que establece las características de diseño para sistemas de acueducto y saneamiento básico rurales (Ministerio de Vivienda, 2018), se realiza entonces una evaluación de la dotación neta con base en el artículo 32 de la resolución anteriormente mencionada, escogiendo un valor de d_{neta} de 120 litros/habitante/día distribuidos según la Tabla 10 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 20 % 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 11) 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 **0,20 l/s** sin incluir pérdidas

Tabla 11: Volumen de subsistencia para el antiguo ETCR en estudio.

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

del sistema.

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

Lo que se traduce en un volumen de subsistencia de 72 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 12.

Tabla 12: Porcentaje de uso de agua de los proyectos productivos en el antiguo ETCR.

Actividad	Usos %	Litros/vivienda
Agricultura (Yuca, Platano, Maiz y Huertas)	30 %	21,6
Cría de animales (Aves y Ganado), Confec-ciones	70 %	50,4
Total	100 %	72

3.4.2. Caudal de diseño sistema de tratamiento de agua potable

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

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

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 Llano Grande de $Q_D = 1,6 \text{ l/s}$. 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 **1,8 l/s**.¹³¹

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

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

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

El caudal de diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales para el antiguo ETCR Llano Grande es de **1,4 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).

3.4.4. Oferta hídrica

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

3.4.4.1. Descripción de la fuente hídrica

La fuente hídrica de la cual se proyecta captar el agua para el uso del antiguo ETCR Llano Grande se conoce como Yolombal, es un cuerpo lótico de escorrentía superficial de agua dulce. Las coordenadas del punto de captación se presentan a continuación en la Tabla 13 con información adicional, las coordenadas se presentan en el sistema Magna Colombia Bogotá. En la Figura 38 se presenta el trazado de la cuenca hidrográfica correspondiente a dicha captación, la cuenca tiene un área de drenaje de 0,86 km². Por otra parte, en la Figura 39 se presenta una fotografía del potencial sitio de captación.

3.4.4.2. 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

Tabla 13: Características de la fuente abastecedora proyectada antiguo ETCR Llano Grande

Características	Vegetación	Lecho	X	Y	Z (msnm)
Quebrada sin actividades antrópicas. Alta presencia de vegetación en la cuenca	Vegetación alta y espesa	Lecho en grava	760426,3	1275955,8	1706

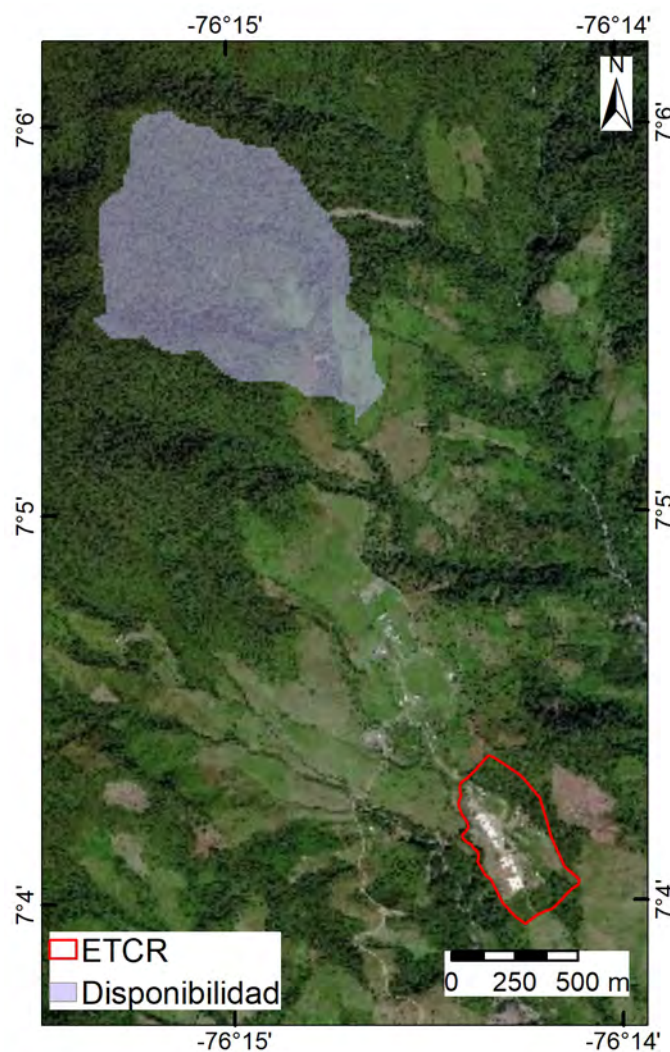


Figura 38: Cuenca del sitio de captación

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



Figura 39: Sitio de captación para antiguo ETCR Llano Grande

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 Riosucio (código 11117050) la cual se presenta en la Figura 40.

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

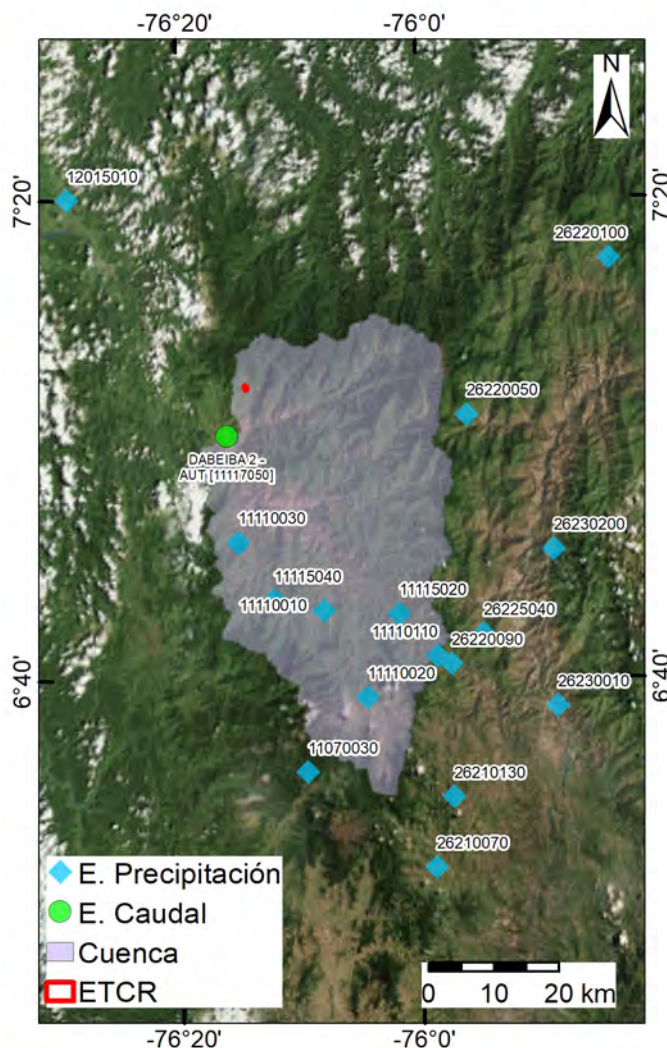


Figura 40: Cuenca e información hidroclimática empleada para la calibración del modelo

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 (X_1), la cual se toma de registros diarios de estaciones que influyencien el área de la cuenca, ponderando cuál es la contribución de cada una de estas estaciones. En cada uno de los nodos (D_i)

parte del agua se distribuye: una parte se dirige a uno de los tanques, y otra continúa hasta los niveles inferiores (X_i). La cantidad de agua que sigue hasta los niveles inferiores dependerá de la cantidad de agua que quede disponible después de la derivación en el nodo, del estado de almacenamiento del tanque y de la conductividad hidráulica del nodo del conducto posterior al nodo. Cada tanque realiza una descarga (Y_i), que depende del volumen almacenado en el tanque.

A partir del segundo tanque, cada una de estas descargas corresponde a los diferentes aportes que se realizan al caudal: el aporte por escorrentía directa, el aporte por flujo subsuperficial y el aporte por el flujo base. En la Figura 41 se presenta un esquema del funcionamiento del modelo de tanques, así como la asociación física que tiene cada una de las etapas del modelo.

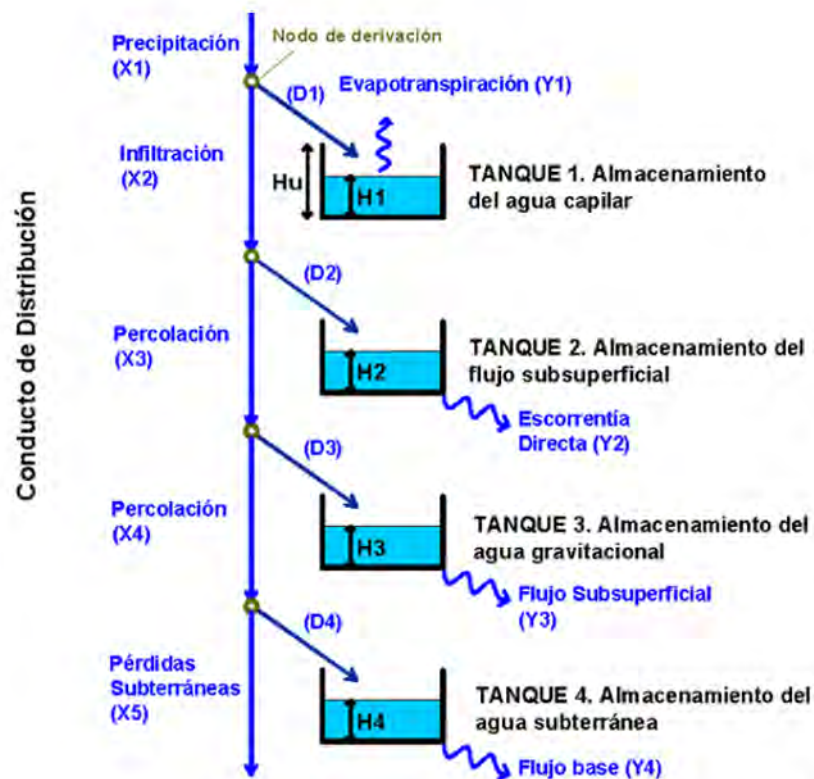


Figura 41: Esquema de funcionamiento del modelo

Tanque 1: Almacenamiento Capilar en el Suelo: Antes del tanque 1, el modelo deriva la precipitación X_1 en el nodo D_1 . Parte del agua va a los conductos inferiores, y parte se almacena en el tanque. El primer tanque representa el agua que transita por la cuenca y que solo sale por evapotranspiración, por lo que no hace parte de la escorrentía. En ella se ve representada el agua que es

almacena en el suelo por capilaridad, a la detención de agua en los charcos y a la interceptación. La capacidad máxima de almacenamiento del tanque Hu está relacionada con la capacidad del suelo y de la cobertura de la superficie para almacenar agua. La capacidad de cobertura de la superficie para almacenar el agua está estrechamente relacionada con la cobertura vegetal de la cuenca.

Tanque 2. Almacenamiento de Flujo Superficial: El tanque 2 del modelo representa el agua que puede infiltrarse a niveles inferiores del suelo o la que se transforma en escorrentía directa. La cantidad de agua que es almacenada en el segundo tanque ($H2$) depende de la capacidad del suelo para dejar pasar agua a su interior, representado a través de la conductividad hidráulica, que está en función del tipo y estructura del suelo, y que puede ser relacionada con la cobertura vegetal y los usos generales que tenga el suelo. La cantidad de 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 11117050, que envuelve la zona de estudio, se ubica sobre el Riosucio y cuenta con más de 35 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 de Riosucio es hidrológicamente similar a la microcuenca abastecedora del antiguo ETCR Llano Grande, logrando de esta manera cierta representatividad de los parámetros a escala regional. La calibración se realiza en el período temporal comprendido entre 1976 y 2013 (37 años de registros diarios aproximadamente).

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

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

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

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

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

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

Tabla 14: Parámetros calibrados para el modelo de tanques

Parámetros	Valor	Mínimo Sugerido	Máximo Sugerido
Almacenamiento Máximo Capilar	215,84	20	600
Conductividad Capa Sup (mm/día)	50,31	1	100
Conductividad Capa Inf (mm/día)	7,14	0,01	10
Perdidas Subterráneas (mm)	0,01	0	10
Tiempo de Residencia Flujo Superficial (días)	10	1	10
Tiempo de Residencia Flujo Subsuperficial (días)	10	1	10
Tiempo de Residencia Flujo Base (días)	51,10	50	200
Condiciones Iniciales (mm)			
Almacenamiento Capilar	221,11	0	216
Almacenamiento Agua Superficial	0	0	10
Almacenamiento Gravitacional Z Sup	0	0	30
Almacenamiento Gravitacional Z Inf (acuífero)	153,70	0	2000

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 14 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 42 se muestra la curva de duración de caudales (CDC) observada y estimada, la Figura 43 presenta la serie de caudales observados contra los estimados. En general los resultados del modelo son satisfactorios. En la Figura 44 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 45

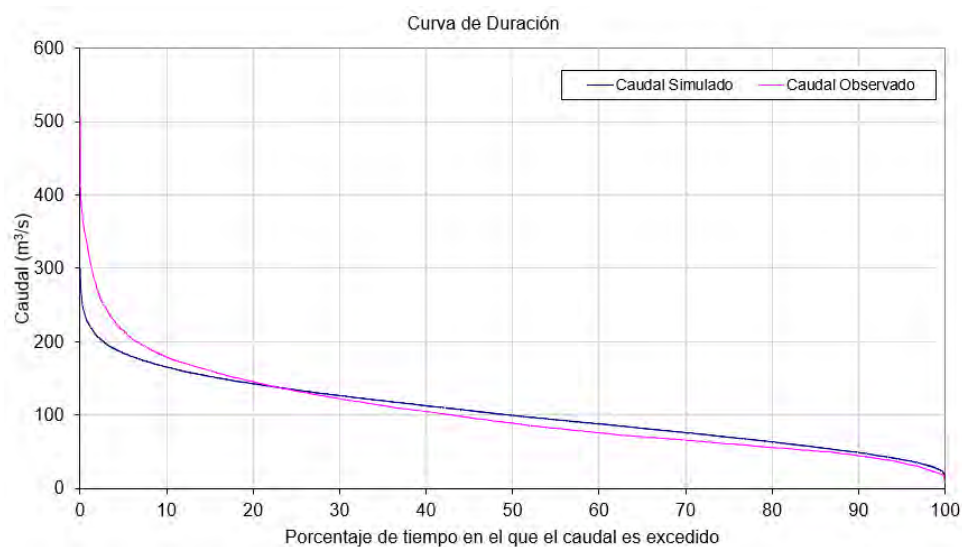


Figura 42: CDC entre la serie estimada y la observada

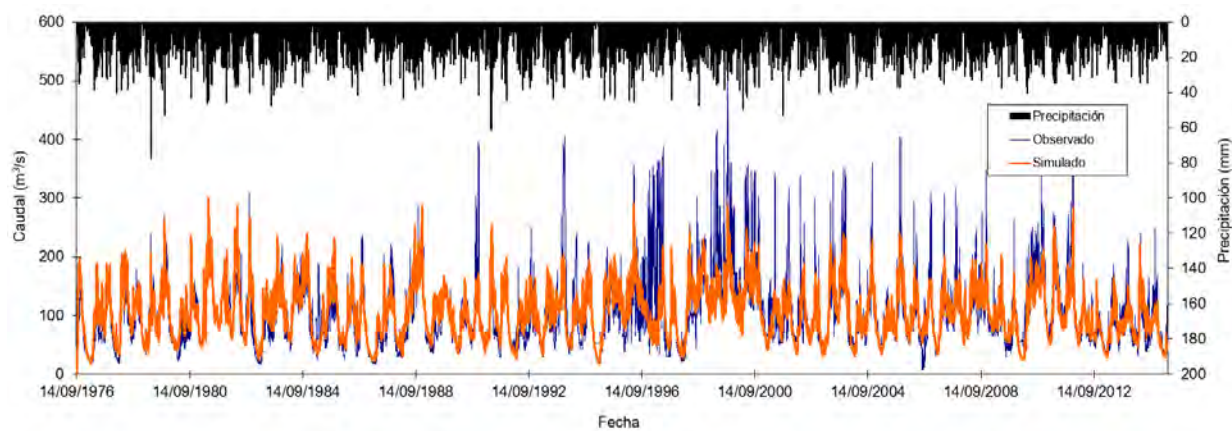


Figura 43: Serie de caudal estimada y observada

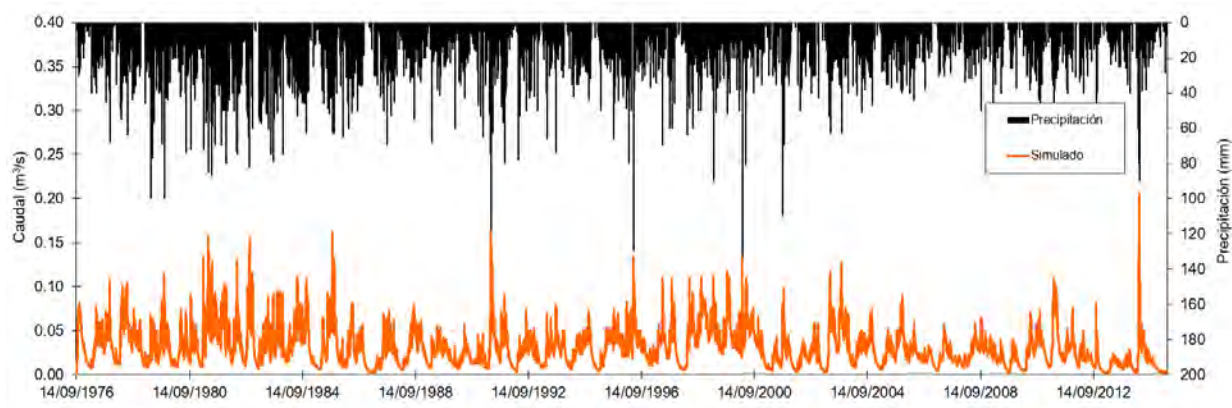


Figura 44: Serie de caudal sintética microcuenca abastecedora

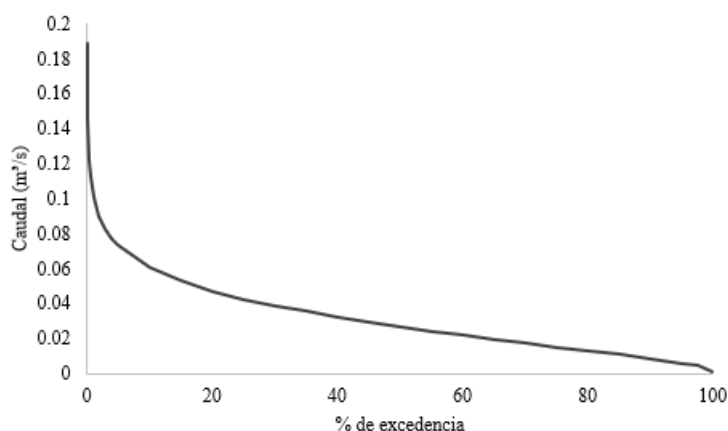


Figura 45: Curva de duración de caudales - microcuenca abastecedora

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

A continuación, en la Tabla 15 se presenta el cálculo del caudal ambiental según cada una de las metodologías y para la microcuenca abastecedora del antiguo ETCR.

Tabla 15: Caudal ambiental microcuenca abastecedora

M1 (l/s)	M2 (l/s)	M3 (l/s)	Qeco (l/s)
4,30	3,81	8,40	8,40

3.4.4.4. Disponibilidad hídrica

procede entonces a calcular la oferta hídrica para año hidrológico medio y año hidrológico seco. A partir de los resultados obtenidos del modelo lluvia-escorrentía, se calcula la oferta hídrica mensual y media multianual anual, para las condiciones de año hidrológico medio. La oferta hídrica se define en Colombia como “el volumen de agua disponible para satisfacer la demanda generada por las actividades sociales y económicas del hombre” (Resolución 865 de 2004). El Estudio Nacional del Agua 2010 define la oferta hídrica como el volumen de “agua continental que escurre por la superficie e integra los sistemas de drenaje superficial”. A su vez, afirma que la oferta se calcula a partir de la escorrentía superficial y está asociada directamente con los aportes de las áreas de las cuencas lo cual se ve representado en el caudal. El año hidrológico seco: son los caudales mínimos mensuales de las series de caudales medios, los cuales se identifican con el año típico seco (incluye períodos de los eventos El Niño y La Niña). Se presenta el ciclo anual para la microcuenca abastecedora en la Figura 46. En la Tabla 16 se presenta el cálculo de la oferta hídrica para la microcuenca. abastecedora.

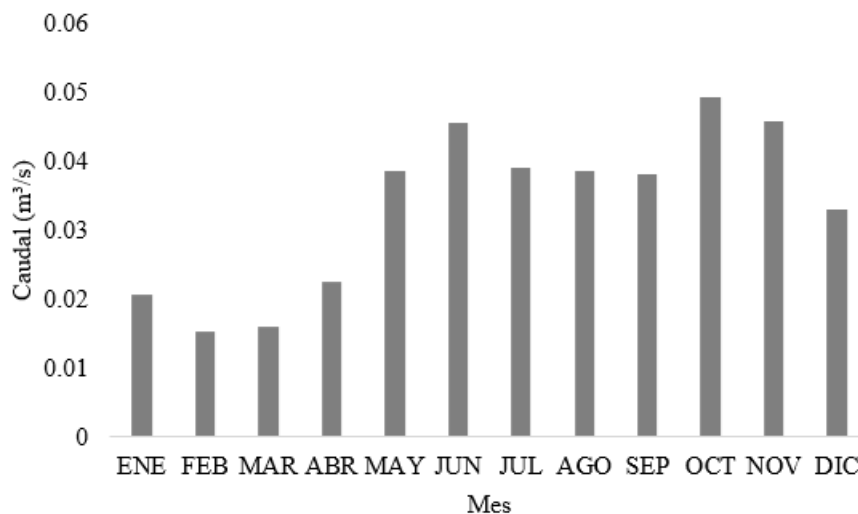


Figura 46: Ciclo anual de caudales en año medio para microcuenca abastecedora

Tabla 16: 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)
11,0	33,6	8,4	2,6	25,2

3.5. Caracterización y calidad de agua a tratar

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

3.5.1. Calidad de agua para consumo humano

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

Se toman caracterizaciones típicas de las aguas crudas de fuentes de captación (ver Tabla 17), 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 17: 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

Tabla 17 continúa de la página anterior

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

3.5.2. Calidad de vertimiento para aguas residuales

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

De igual manera se escoge como caracterización típica de aguas residuales una composición media de los parámetros especificados en la Tabla 18, 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 18: Composición típica agua residual doméstica (Metcalf y cols., 1979).

Parámetro	Fuerte	Media	Débil
Sólidos Totales (mg/l)	1200	720	350
Sólidos Disueltos (mg/l)	850	500	250
Sólidos Disueltos Volátiles (mg/l)	325	200	105
Sólidos en Suspensión (mg/l)	350	220	100
Sólidos Sedimentables (ml/L)	20	10	5
DBO_5 (mg/l)	400	220	100
Carbono Orgánico Total (mg/l)	290	160	80
DQO (mg/l)	1000	500	250

Tabla 18 continúa de la página anterior

Nitrógeno Total (mg/l)	85	40	20
Nitrógeno Orgánico (mg/l)	35	15	8
Nitrógeno Amoniacal (mg/l)	50	25	12
Fósforo (mg/l)	15	8	4
Fósforo Orgánico (mg/l)	5	3	1
Fósforo Inorgánico (mg/l)	10	5	3
Cloruros (mg/l)	100	50	30
Alcalinidad ($mgCaCO_3/l$)	200	100	50
Grasas (mg/l)	150	100	50

3.6. Tratamiento de aguas crudas

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

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

3.7. Tratamiento de aguas residuales

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

De acuerdo a la naturaleza y composición de las aguas residuales municipales, los procesos de depuración del agua más usados por su sostenibilidad y simplicidad son los físicos y biológicos, debido a que teóricamente cumplen con las remociones requeridas para los principales contaminantes. Teniendo en

cuenta la magnitud de agua a tratar diariamente no es muy usual en el país el reúso del agua por lo que tratamientos terciarios o avanzados son utilizados normalmente en tratamiento de aguas no domesticas de caudales relativamente pequeños comparado con las aguas producidas por un municipio del orden mayor a cincuenta mil habitantes.

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

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

3.7.1. Proceso aerobio

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

3.7.2. Proceso anaerobio

Proceso de fermentación donde la descomposición u oxidación de la materia o compuestos orgánicos se lleva a cabo mediante la ausencia de oxígeno libre,

el proceso es poco menos eficiente en la producción de energía que el aerobio por lo que la producción de biomasa se ve limitada, produciendo básicamente CH_4 , CO_2 , H_2O y H_2S . Algunos tratamientos anaerobios de crecimiento adherido o suspendido son:

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

3.7.3. Proceso anóxico

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

Referencias

- de Desarrollo 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 47.

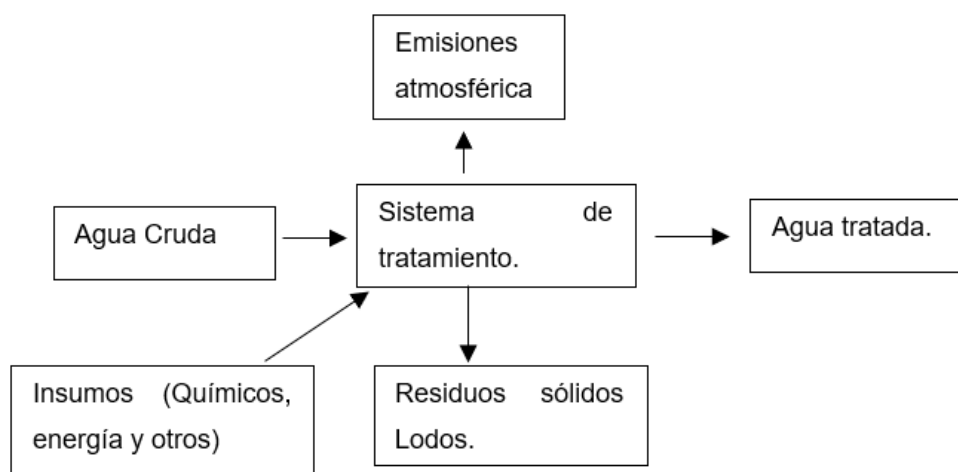


Figura 47: Balance de masas.

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 48.

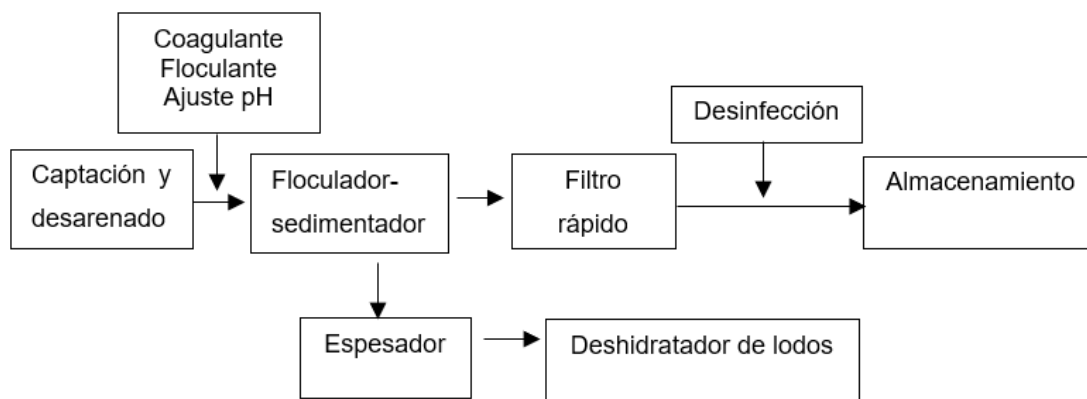


Figura 48: Tren tratamiento PTAP Alternativa 1.

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 49), 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.

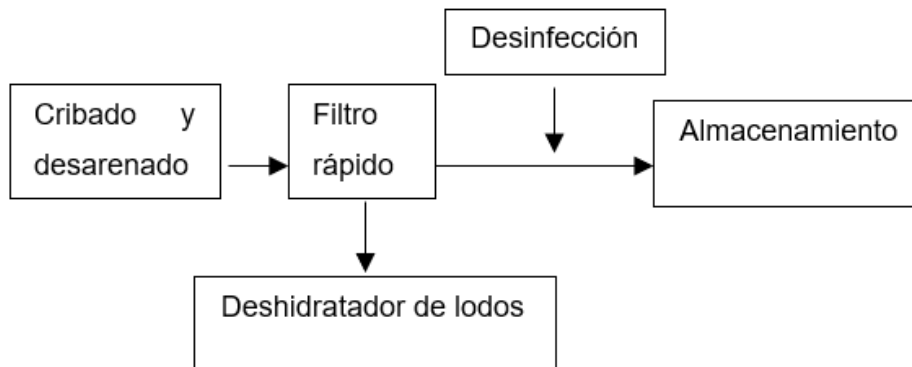


Figura 49: Tren tratamiento PTAP Alternativa 2.

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 50.

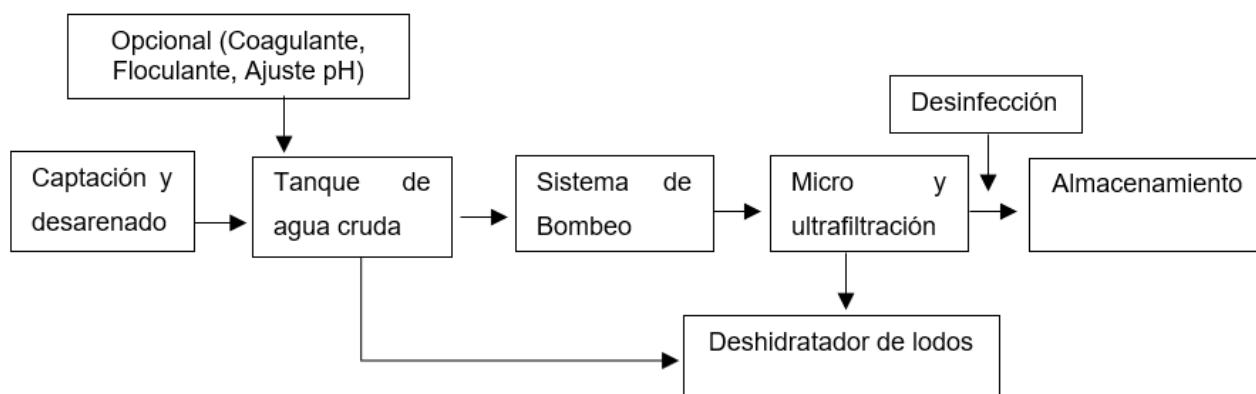


Figura 50: Tren tratamiento PTAP Alternativa 3.

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 51.

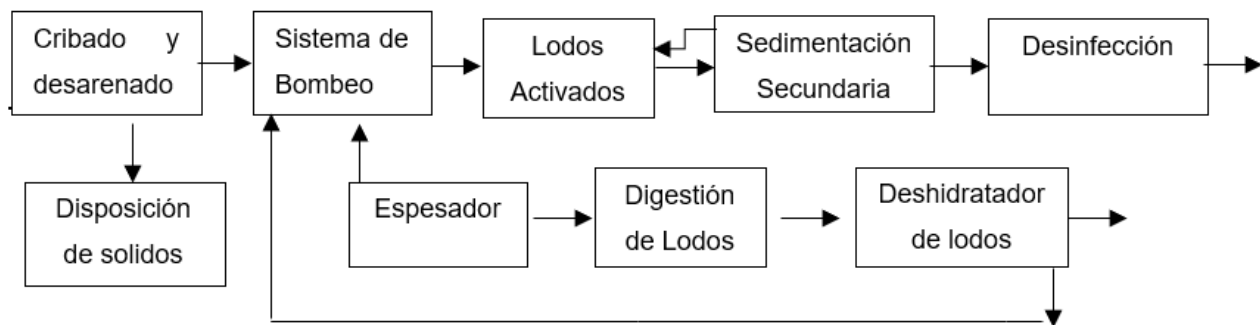


Figura 51: Tren tratamiento PTAR Alternativa 1.

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 52.

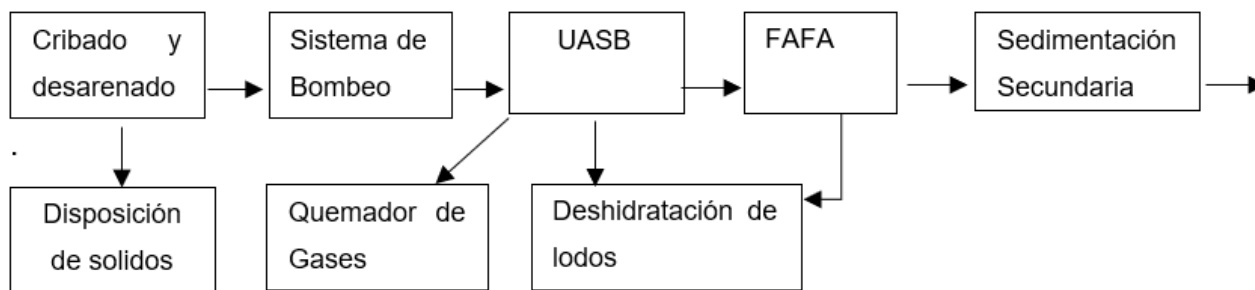


Figura 52: Tren tratamiento PTAR Alternativa 2.

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 contruidos, 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 53.

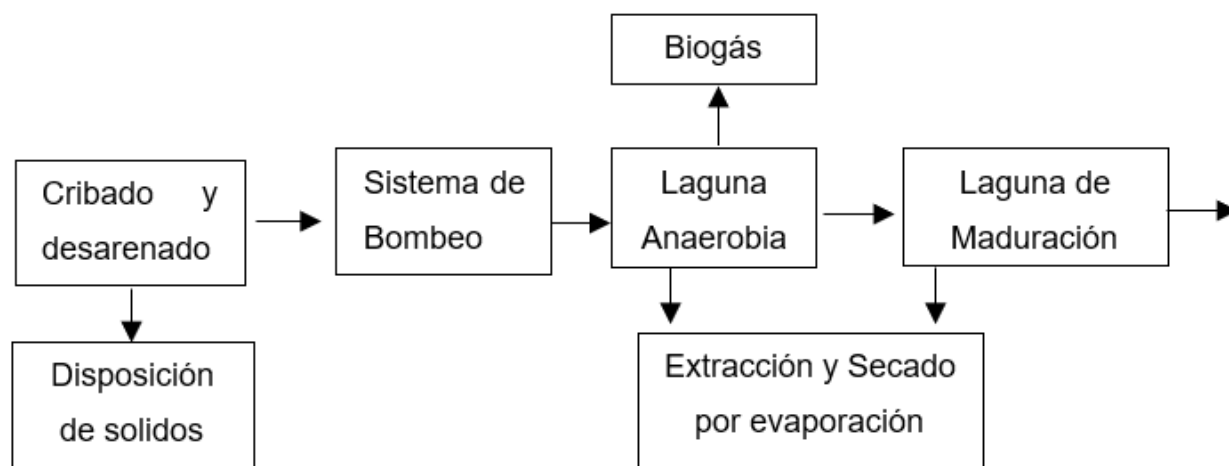


Figura 53: Tren tratamiento PTAR Alternativa 3.

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 bajos 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 19, 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 19: Ponderación de factores según criterios

Factor evaluado	Ponderación PTAR	Ponderación PTAP
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 20 para la PTAP y en la Tabla 21 para la PTAR.

Tabla 20: Cálculos alternativas PTAP

Parámetro	Alternativas
Cálculos	
Q Diseño (l/s)	1.8

Tabla 20 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	6.5
Volumen Floculador sedimentador (m^3)	2.2	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)	1.15	0.43	0.43
Costo promedio químicos (\$/día)	20,083.1	7,484.4	7,484.4
Área Reactor (m^2)	3.0	1.0	2.0
Potencia de equipos requeridos (KW)	2.0	1.9	5.5
Valor KW/hora	500.0	500.0	500.0
Consumo energético \$/día	21,450.0	20,350.0	59,950.0
Costos operativos \$/día	41,533.1	27,834.4	67,434.4
Costos de construcción ¹	2.0	1.0	3.0

Tabla 21: Cálculos alternativas PTAR

Parámetro	Alternativas
Cálculos	

¹Los 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 21 continúa de la página anterior

Q Diseño (l/s)	1.4		
DBOin (ppm)	220.0		
DQOin (ppm)	500.0		
SSTin (ppm)	220.0		
Kg DBO/día	27		
Kg DQO/día	60		
Kg SST/día	27		
Alternativas	Lodos Activa- dos	UASB+FAFA	Lagunas
TRH h	13.2	7.0	120.0
Volumen Total Reacción (m^3)	66.5	35.3	604.8
Profundidad reactor (m)	3.0	6.0	1.0
Área Reactor (m^2)	22.2	5.9	604.8
Eficiencia de Remoción DQO	64 %	64 %	64 %
Eficiencia de Remoción DBO	59 %	59 %	59 %
Lodos producidos tra- tamiento secundario Kg SS/día	7.0	4.26	10.6
Potencia de equipos reque- ridos (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^3 de reactor en PRFV/Geomembrana	850,000.0	850,000.0	350,000.0
Costos de construcción (\$)	56,548,800.0	29,988,000.0	211,680,000.0
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 22.) como entrada y salida cumpliendo lineamientos de vertimientos (Art.8 Resolución 631 del 2015).

Tabla 22: Composición típica agua residual doméstica

Parámetro	Fuerte	Media	Débil
Sólidos Totales (mg/l)	1200	720	350
Sólidos Disueltos (mg/l)	850	500	250
Sólidos Disueltos Volátiles (mg/l)	325	200	105
Sólidos en Suspensión (mg/l)	350	220	100
Sólidos Sedimentables (ml/L)	20	10	5
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 54) 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 ₅ 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
GRADO DE TRATAMIENTO						
- Necesita un tratamiento convencional			NO	NO	Si, hay veces (ver requisitos para uso FLDE: literal C.7.4.3.3)	SI
- Necesita unos tratamientos específicos			NO	NO	NO	SI
- Procesos de tratamiento utilizados			(1) = Desinfección + Estabilización	(2) = Filtración Lenta o Filtración Directa + (1)	(3) = Pretratamiento + [Coagulación + Sedimentación + Filtración Rápida] o [Filtración Lenta Diversas Etapas] + (1)	(4) = (3) + Tratamientos específicos

Figura 54: Calidad de la fuente.

4.5.4. Calificaciones Matriz PTAP

A continuación se presentan la Tabla 23 en la cual se hace la calificación de alternativas para la PTAP de acuerdo a la metodología descrita en la sección 4.4.

Tabla 23: Calificaciones de PTAP

ALTERNATIVAS:		ALT. 1	ALT. 2	ALT. 3
Factor evaluado	Comentarios del evaluador	Calif.	Calif.	Calif.

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

Costo de operación y mantenimiento	La alternativa 2, cuenta con costos operativos menores por la simplicidad del tratamiento, luego la alternativa 3 presenta los costos de mayor impacto por los costos energéticos asociados a la tecnología.	5	5	2
Criterios de diseño.	Existe suficiente literatura y Colombia tiene dentro de la normativa vigente los criterios de diseño requeridos para las tres alternativas.	5	4	3
Tecnología ampliamente probada.	Debido a la magnitud de los sistemas y por estar enfocada a poblaciones rurales, la mayor calificación se otorga a los sistemas de menor complejidad en operación, así todas se hayan probado ampliamente en el país.	4	4	3
Complejidad de construcción y equipamiento.	La complejidad de la alternativa 3, es mayor debido a la tecnología y equipos requeridos, la filtración directa es la más simple.	3	4	2
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 24 en la cual se hace la calificación de alternativas para la PTAR de acuerdo a la metodología descrita en la sección 4.4.

Tabla 24: 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 tecno- logía para adecuación a cumplimien- to 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 convierta en la tecnología de mayor puntuación, debido a los equipos requeridos por los lodos activados y al área de las lagunas.	3	5	1
Costo de operación y mantenimiento	Las lagunas requieren de bajo costo de mantenimiento respecto a los lodos activados, debido al equipamiento.	1	3	5
Criterios de diseño.	Existe suficiente literatura y Colombia tiene dentro de la normativa vigente los criterios de diseño requeridos para las tres alternativas.	4	4	4
Tecnología ampliamente probada.	Debido a la magnitud de los sistemas y por estar enfocada a poblaciones rurales, la mayor calificación se otorga a los sistemas de menor complejidad en operación, así todas se hayan probado ampliamente en el país.	3	4	4

Complejidad de construcción y equipamiento.	La construcción y el equipamiento del sistema de lodos activados y del sistema lagunar son más complejos que los UASB, el primero por el equipamiento y el segundo por la adecuación de los terrenos.	3	4	2
Flexibilidad de la operación.	Los procesos que implican sistemas modulares presentan mayor flexibilidad ante paros por mantenimientos o contingencias, por lo que el sistema lagunar por el área requerida pocas veces tiene dualidad en las unidades.	5	4	2
Confiabilidad del proceso.	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.	3	3	4
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.	2	4	5

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 COAGULACION, FLOCULACION, SEDIMENTACION, FILTRACION, DESINFECCION		ALTERNATIVA 2 FILTRACION, DESINFECCION		ALTERNATIVA 3 TANQUE DE AGUA CRUDA + MICRO + ULTRA FILTRACION, DESINFECCION	
		CALIFICACION 0= no aplica 1= deficiente 2= regular 3= adecuado 4= bueno 5= muy bueno	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	5.0	1.0	2.0	3.0	0.8	1.6
2	2	5.0	1.0	2.0	3.0	0.8	1.0
3	2	4.0	0.8	1.6	3.0	0.8	1.0
4	2	3.0	0.6	1.2	5.0	1.0	0.4
5	30	5.0	1.0	30.0	2.0	0.4	0.8
6	5	3.0	0.6	3.0	5.0	1.0	0.4
7	7	1.0	0.2	1.4	5.0	1.0	0.2
8	10						1.4
8.1	Inversión	2.5			5.0		1.7
8.3	Sumar las casillas 8.1 y 8.2 y dividir el total entre 10. El resultado anotarlo en la casilla 8.3 E		0.5	5.0		1.0	0.3
9	5						3.3
9.1	Criterios de diseño	5.0			4.0		
9.2	Tecnología ampliamente probada	4.0			4.0		3.0
9.3	Complejidad en la construcción y equipamiento	3.0			4.0		3.0
9.4	Sumar las casillas 9.1D, 9.2D, 9.3D y dividir el total entre 15. El resultado anotarlo en la casilla 9.4		0.8	4.0		0.8	2.0
10	30						4.0
10.1	OPERACION						0.5
10.1	Flexibilidad de operación	4.0			5.0		2.0
10.2	Confiable del proceso	4.0			3.0		5.0
10.3	Complejidad de operación del proceso	4.0			5.0		3.0
10.4	Requerimiento de personal	4.0			5.0		3.0
10.5	Requerimientos análisis y controles	3.0			5.0		3.0
10.6	Disponibilidad de repuestos y centros de servicio	3.0			4.0		2.0
10.7	Sostenibilidad en Operación y mantenimiento	4.9			5.0		1.7
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		0.8	23.0		0.9	16.9
11	5						
11.1	ENTORNO						
11.1	Influencia de la temperatura	3.0			3.0		3.0
11.2	Producción de ruido	3.0			3.0		2.0
11.3	Contaminación visual	2.0			3.0		3.0
11.4	Producción de malos olores	3.0			3.0		3.0
11.5	Calidad del agua tratada	4.0			3.0		5.0
11.6	Sumar las casillas 11.1D, 11.2D, 11.3D, 11.4D, 11.5D y dividir el total entre 25. El resultado anotarlo en la casilla 11.6E		0.6	3.0		0.6	3.2
12	100						59.9
	12E			76.2		74.0	
	SUMAR LOS VALORES DE LA COLUMNA E Y ANOTAR EL RESULTADO EN LA CASILLA						

Figura 55: Matriz de decisión PTAP.

4.6.2. Matriz de decisión PTAR

		TIPO DE TRATAMIENTO		LADOS ACTIVADOS+ CLARIFICACION		UASB+FAFA+ CLARIFICACION		SISTEMA LAGUNAR	
		EFICIENCIAS A GARANTIZAR (%DBO)		59%		64%			
		EFICIENCIAS A GARANTIZAR (%DQO)							
#	%	PROCESO EVALUADO: PTAR		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
1	2	APLICABILIDAD DEL PROCESO (Variaciones de Caudal)		4.0	0.8	1.6	3.0	0.6	1.2
2	3	APLICABILIDAD DEL PROCESO (Eficiencias de remoción carga orgánica)		4.0	0.8	2.4	3.0	0.6	1.8
3	5	GENERACION DE RESIDUOS		3.0	0.6	3.0	5.0	1.0	5.0
4	5	ACEPTACION POR PARTE DE LA COMUNIDAD		5.0	1.0	5.0	2.0	0.4	2.0
5	15	flexibilidad de la tecnología para adecuación a cumplimiento cambio normativo		4.0	0.8	12.0	3.0	0.6	9.0
6	5	VIDA UTIL		2.0	0.4	2.0	4.0	0.8	4.0
7	10	REQUERIMIENTO DE AREA		1.0	0.2	2.0	5.0	1.0	10.0
8	10	COSTO							
8.1		Inversión							
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		2.7	0.5	5.3	5.0	1.0	10.0
9	5	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN							
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
10	25	OPERACION							
10.1		Flexibilidad de operación		5.0			4.0		
10.2		Contabilidad 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
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
12	100	SUMAR LOS VALORES DE LA COLUMNA E Y ANOTAR EL RESULTADO EN LA CASILLA 12E				58.4			72.5
									57.3

Figura 56: Matriz de decisión PTAR.

4.7. Resultados y conclusiones

De acuerdo con las calificaciones y criterios de los profesionales evaluadores en las Tablas 23 y 24, 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 76,1 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 ETCR, con base en las características presentadas en el capítulo de viabilidad sanitaria, partiendo de los parámetros de caudal de diseño de la PTAP.

Como variables principales se encuentra el caudal de diseño a suplir del sistema de tratamiento de agua potable el cual corresponde a **1,8 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 1677,5 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 **1,8 l/s**, contando con un veredero 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 20,0 m de la bocatoma, sobre la cota 1676,5 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 1,8 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/cm³ (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 50mm como diámetro adecuado para la conducción del sistema de agua cruda, la cual tiene una longitud total de 1963,81 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 731 hab para el año 2046, y el caudal de diseño del sistema de tratamiento el cual corresponde a 1,8 l/s. Así como las características de calidad del agua de la fuente escogida para el diseño (Ver Tabla 17), 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 (2) módulos
- 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 58), 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 57.



Figura 57: Esquema 3D de la PTAP.

6.1. Diagrama de flujo de procesos.

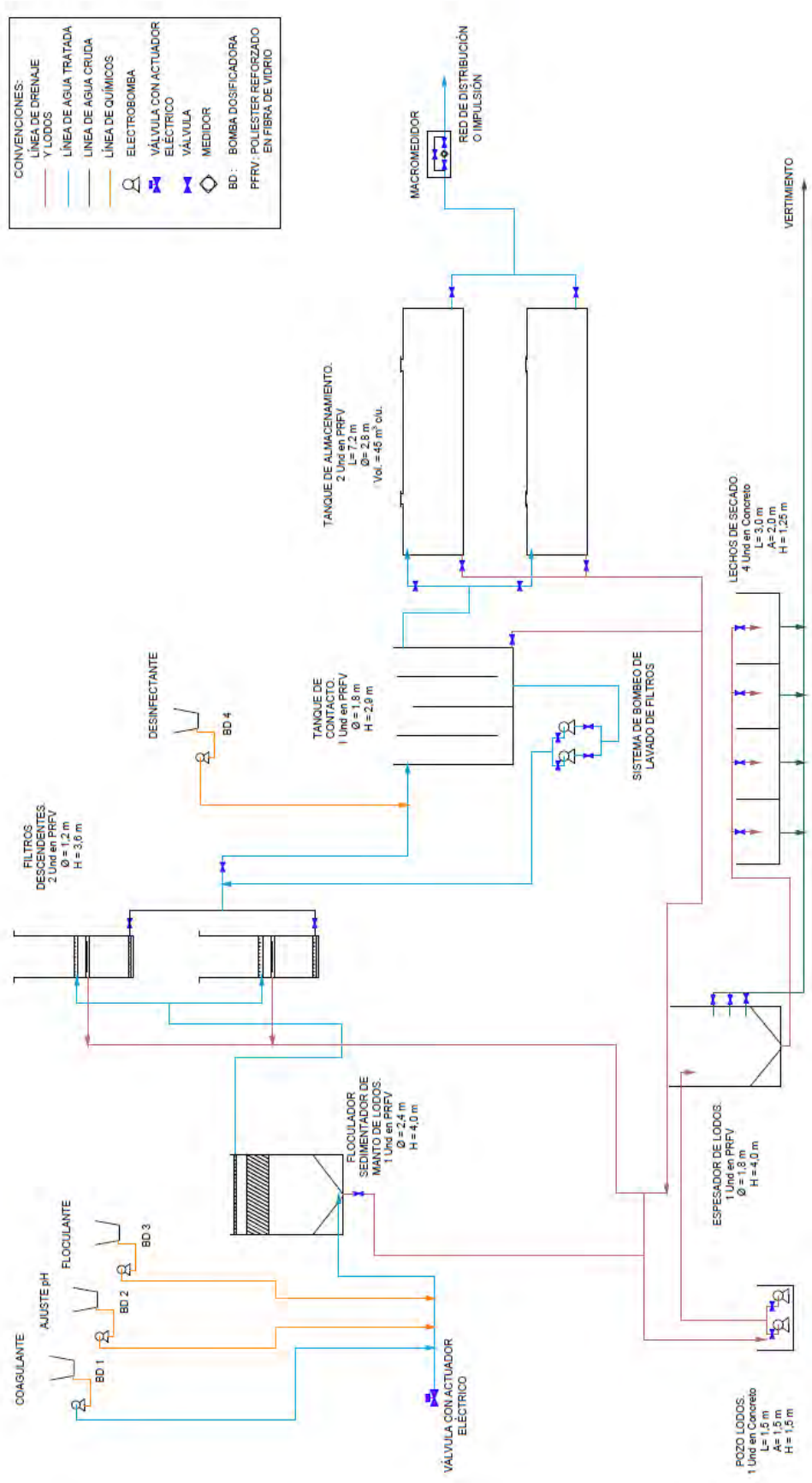


Figura 58: Diagrama de flujo de procesos en la PTAP.

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 25.

Tabla 25: 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 Al/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 $251,18 \text{ kg/m}^3$ (ρ_w) se halla el volumen de coagulante líquido requerido para la concentración mencionada:

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

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

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

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

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

Los resultados para dos opciones de caudal de tratamiento en la PTAP, el caudal de diseño y la mitad de este, se pueden observar en la Tabla 26 y en las memorias de cálculo anexas al informe de diseño, esto con el fin de la modulación del tratamiento.

Tabla 26: Dosificación de coagulante.

Caudal a tratar Q (l/s)	Cantidad a dosificar P1 (kg/min)	Caudal a dosificar q (l/h)
0,90	0,001	0,32
1,80	0,002	0,64

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 27.

Tabla 27: Dosificación desinfectante en la PTAP.

Caudal a tratar Q (l/s)	Caudal a dosificar q (ml/min)
0,90	5,32
1,80	10,63

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 59).

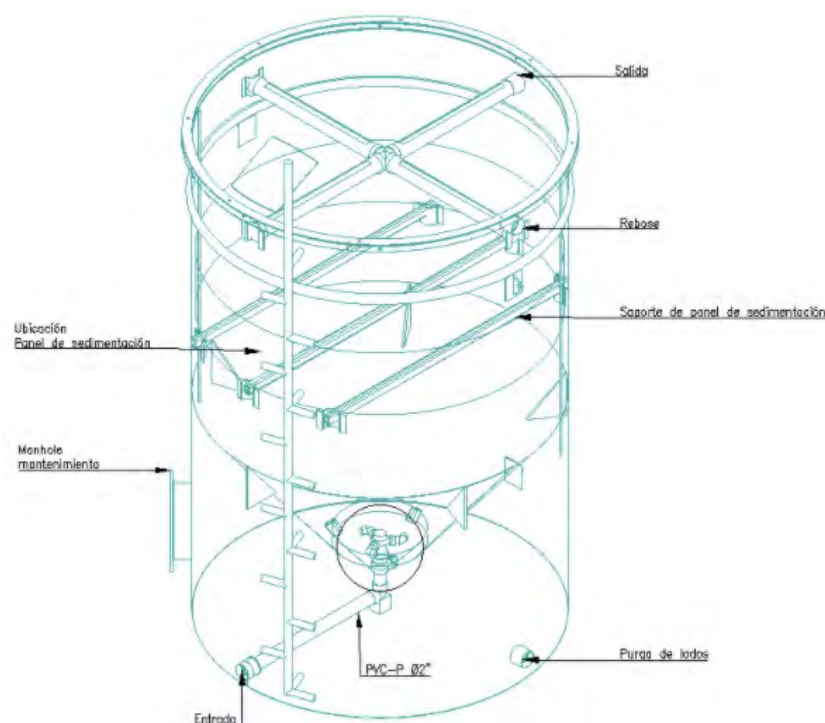


Figura 59: Esquema Floculador Sedimentador de Manto de Lodos (FSML).

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 $0,37 \text{ m}^3$, 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 0,35 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 0,5 m. Las dimensiones más específicas se presentan en la Tabla 28.

Tabla 28: 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)	0,50	m
Altura floculacion (Alt floc)	0,35	m
Altura útil floculador (Alt floc)	1,80	m
Altura total floculador (Alt floc)	4,00	m
Volumen del cilindro (VCI)	8,1	m^3
Volumen total del floculador (VT)	9,7	m^3
Tiempo de detención hidráulico (TDH)	1,5	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 módulos para Floculador-Sedimentador de Manto de Lodos (FSML), para un caudal total de 1,80 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 60) 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.

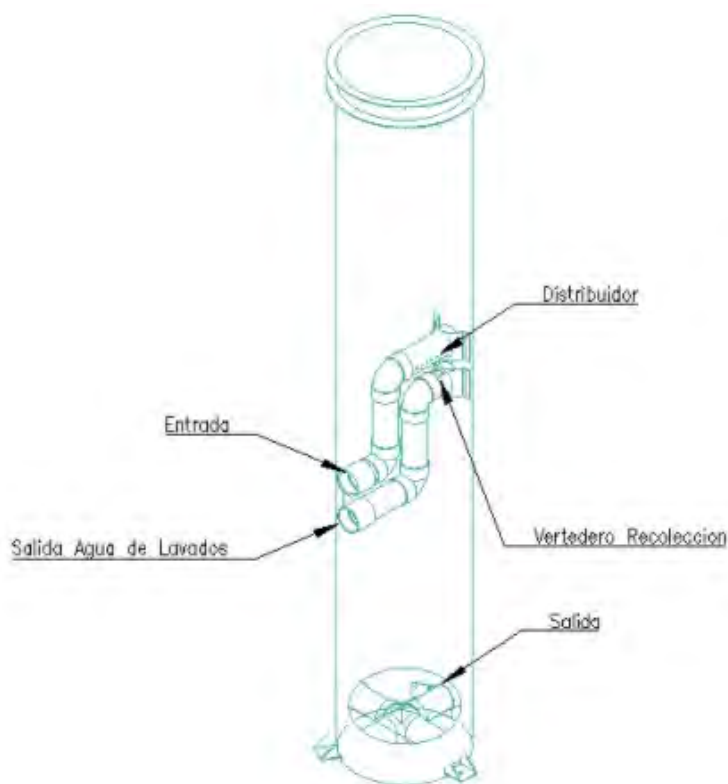


Figura 60: Esquema del filtro en arena.

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 0,90 l/s, y para la operación de lavado se complementará con la presión y el caudal ejercido por una electrobomba con el fin de alcanzar la velocidad ascensional requerida para la expansión del lecho filtrante de acuerdo a lo establecido en la Res. 0330 de 2017 Art. 114 (Ministerio de Vivienda, 2017).

Para realizar el proceso de retrolavado, el caudal requerido por filtro es de 8,0 l/s, para un tiempo de lavado de cada uno de 7 min, lo que genera un volumen de agua de lavado de $3,36 \text{ m}^3$ que se purga hacia el pozo de lodos para luego ser conducido al tratamiento de espesamiento y deshidratación. Las dimensiones generales del sistema de filtración se muestran en la Tabla 29.

Tabla 29: Dimensiones del filtro propuesto.

Parametros/ Datos	Valor	Unidad
Diámetro final del filtro ($\emptyset f$)	1,00	m
Altura material de soporte	0,60	m
Altura medio filtrante	0,90	m
Altura lecho expandido	1,13	m
Altura entre vertederos	0,25	m
Diámetro vertedero de distribución	4,00	pulg
Altura a vertedero de lavado	1,83	m
Diámetro vertedero de lavado	4,00	pulg
Pérdidas en filtración	0,40	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 $99,0 \text{ m}^3/\text{m}^2/d$ 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 $1,80 \text{ l/s}$, 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 30.

Tabla 30: Dimensiones del tanque de contacto.

Parámetro	Valor	Unidad
Tiempo de contacto	40	min
Caudal de diseño	1,80	l/s
Volumen del tanque de contacto	4,32	m^3
Borde libre	0,3	m
Altura útil del tanque de contacto	2,60	m
Área requerida para el tanque	1,66	m^2
Diámetro del tanque	1,45	m
Diámetro adoptado	1,60	m
Altura total del tanque de contacto	2,90	m

El tanque de contacto se propone de cuatro (4) cavidades (Figura 61) 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 61: 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 $60 m^3$ al día, para garantizar dicho almacenamiento se establece dos (2) tanques de almacenamiento de $33,71 m^3$ cada uno, estas dos unidades estarán comunicadas por medio de una tubería inferior que facilita las labores de mantenimiento. el dimensionamiento del tanque se presenta en la Tabla 31 y un esquema del conjunto de tanques se puede observar en la Figura 62.

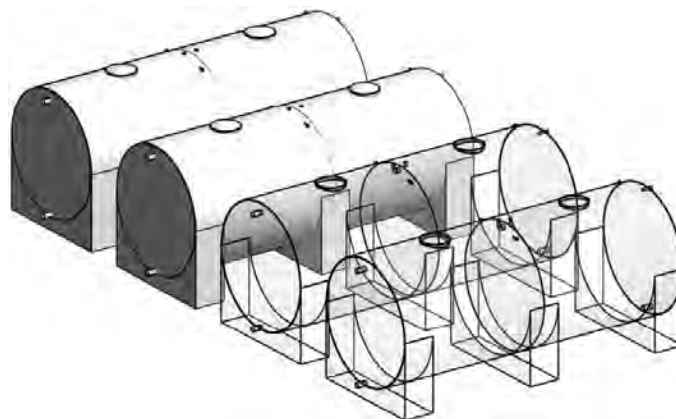


Figura 62: Esquema Tanques de almacenamiento.

Tabla 31: Dimensiones del tanque de almacenamiento.

Parámetros/ Datos	Valor	Unidad
Número de tanques (N)	2	un
Volumen requerido del tanque	30	m^3
Largo asumido del tanque	6,00	m
Borde libre (BL)	0,40	m
Lámina de agua en el tanque	2,40	m
Radio adoptado del tanque	1,40	m
Área útil del tanque	5,62	m^2
Volumen útil del tanque	33,71	m^3
Volumen total del tanque	36,95	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 32).

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

Tabla 32: Tiempo de vaciado del tanque.

Parámetros/ Datos	Valor	Unidad
Coefficiente de descarga (Cd)	0,6	
Diámetro del orificio (Øo)	4,00	pulg
Área del orificio (a)	0,008	m ²
Gravedad (g)	9,81	m/s ²
Carga hidráulica sobre el orificio (ho)	2,40	m
Caudal descargado (Qe)	0,033	m ³ /s
Caudal descargado (Qe)	33,4	l/s
Duración de la descarga (t)	179,75	seg
Duración de la descarga (t)	3,00	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 63), 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 $7,09 \text{ m}^3/d$. 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 $2,1 \text{ m}^3$ que pasa a deshidratación de lodos mediante lechos de secado, y un clarificado de $5,0 \text{ m}^3$.

6.3.3. Lechos de secado

La deshidratación de los lodos provenientes del espesador hidráulico se realiza mediante lechos o eras de secado, el cual tiene como objeto reducir el contenido de agua en el lodo a menos de un 10 % y con concentración de sólidos mayores

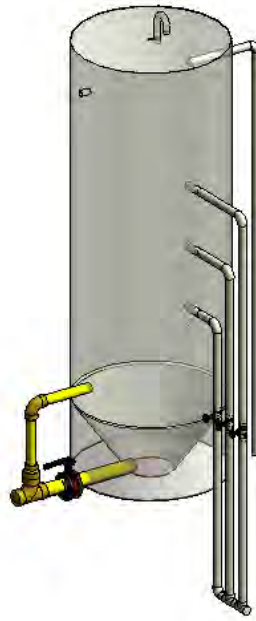


Figura 63: Esquema del espesador hidráulico.

al 25 %, un esquema de este puede verse en la Figura 64. El volumen de lodos a deshidratar diariamente es de $2,1/m^3/día$, 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 65.

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 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

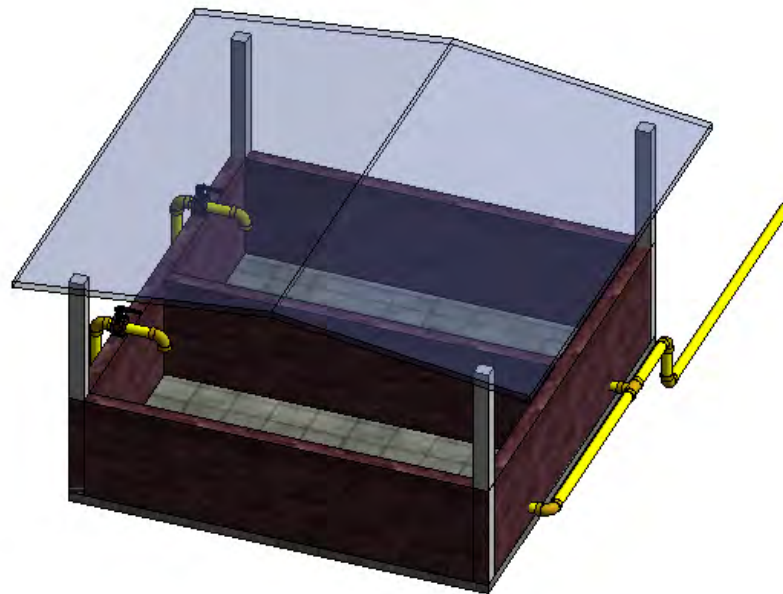


Figura 64: Esquema de los lechos de secado.

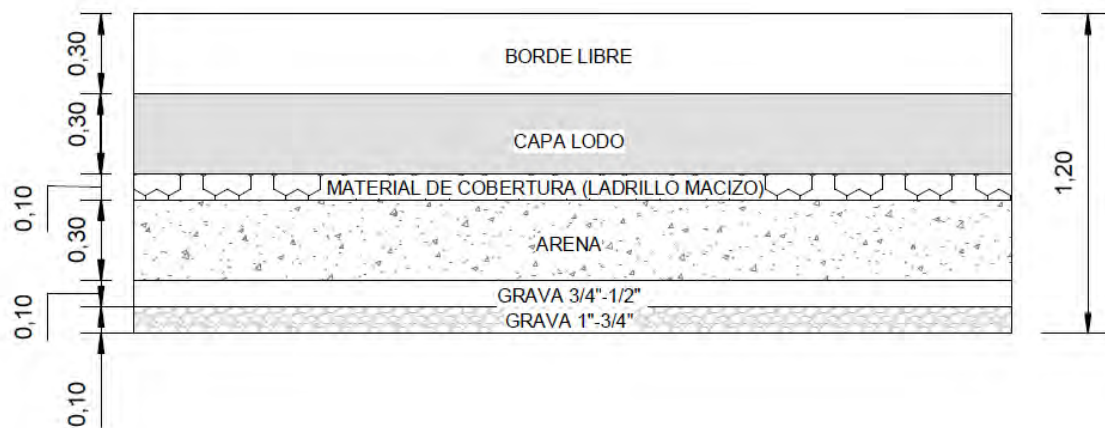


Figura 65: Estratificación de la estructura del lecho de secado (medidas en metros).

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 66).

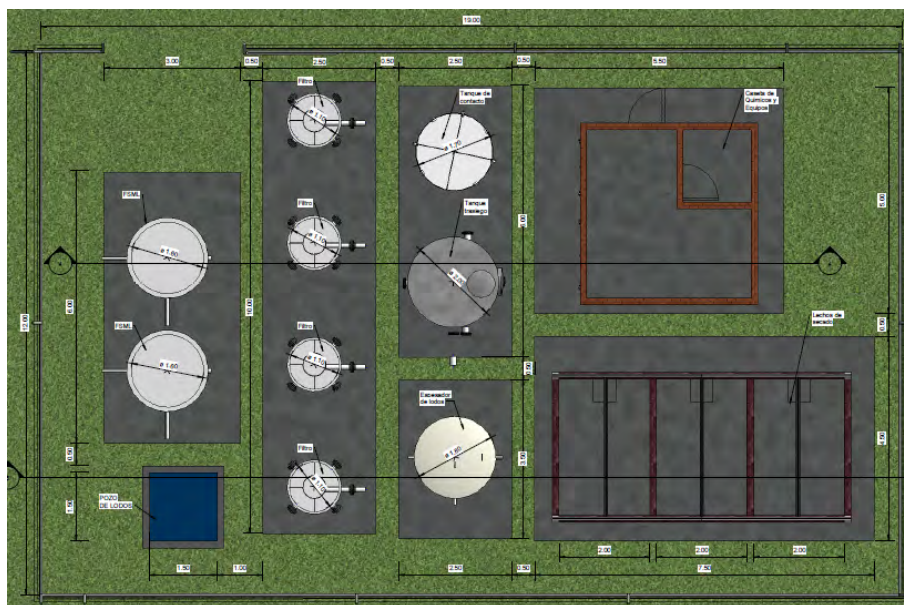


Figura 66: Vista en planta de la distribución propuesta en la PTAP.

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 731 hab para el año 2046, los cuales generan un caudal de diseño del sistema de tratamiento de 1,40 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 (ver Figura 68), en la Figura 67 se puede observar un modelo en 3D del sistema.

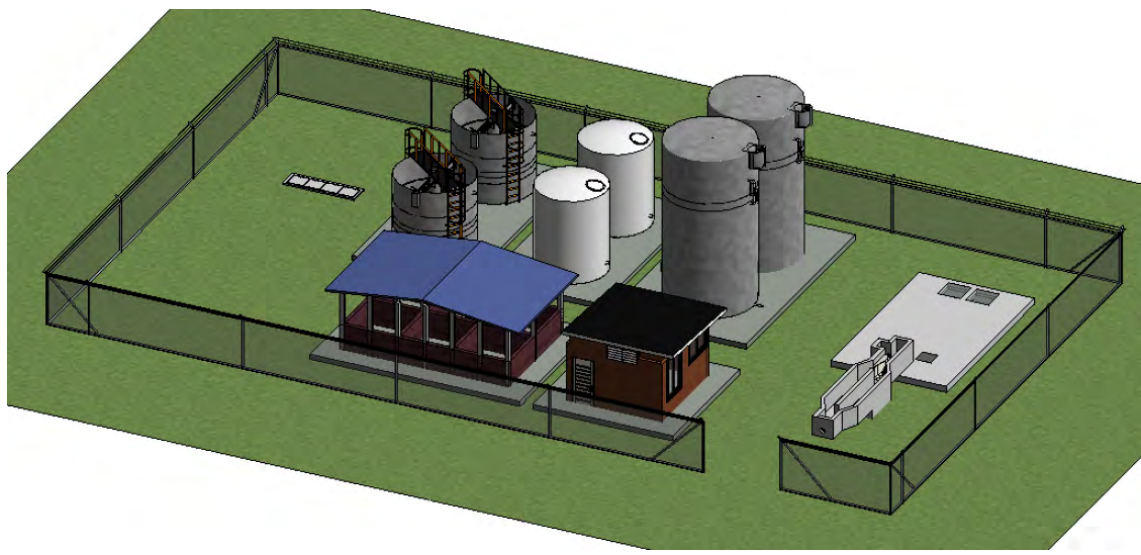


Figura 67: Esquema 3D de la PTAR.

7.1. Diagrama de flujo de procesos

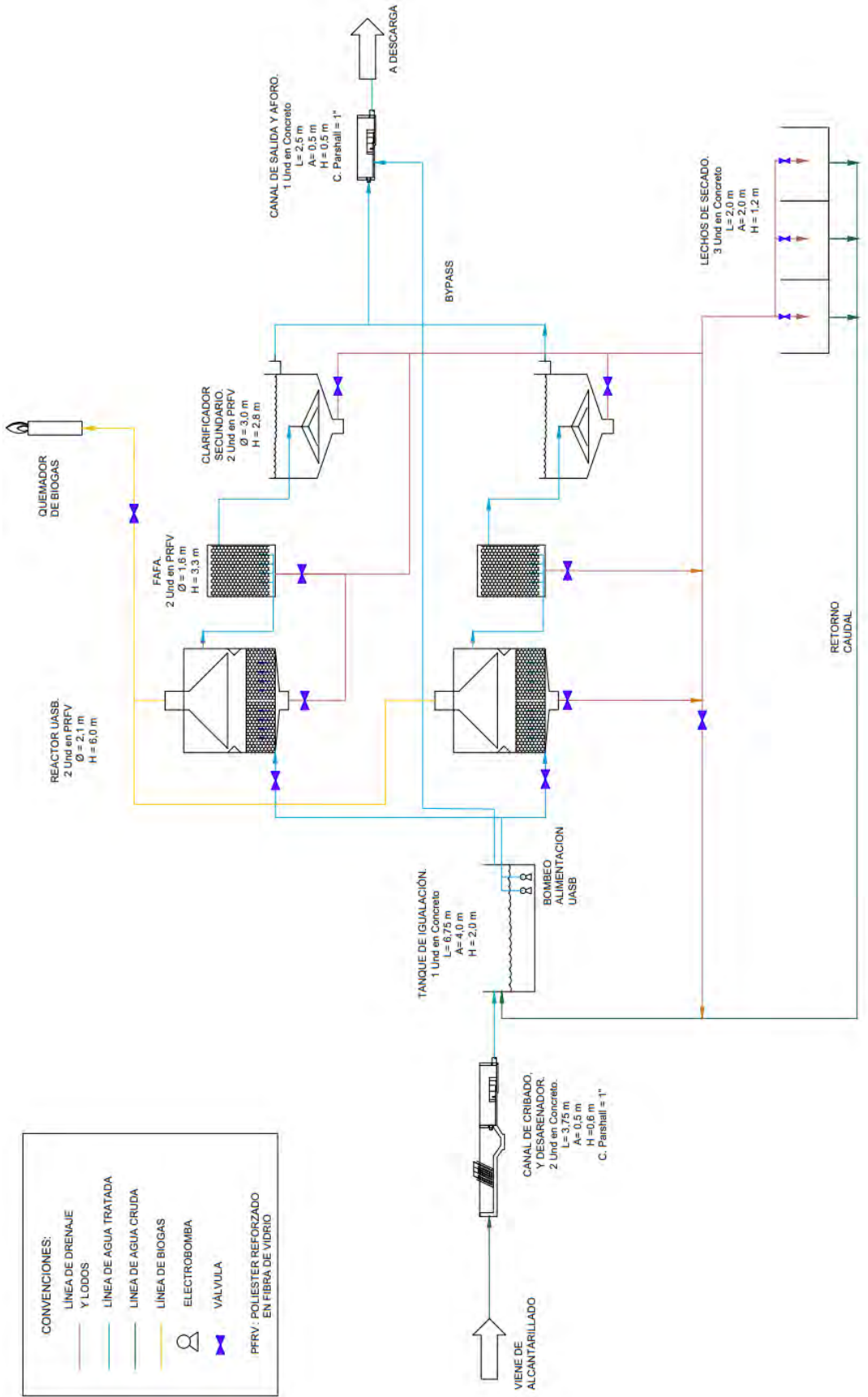


Figura 68: Diagrama de flujo de procesos en la PTAR.

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 1,40 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.

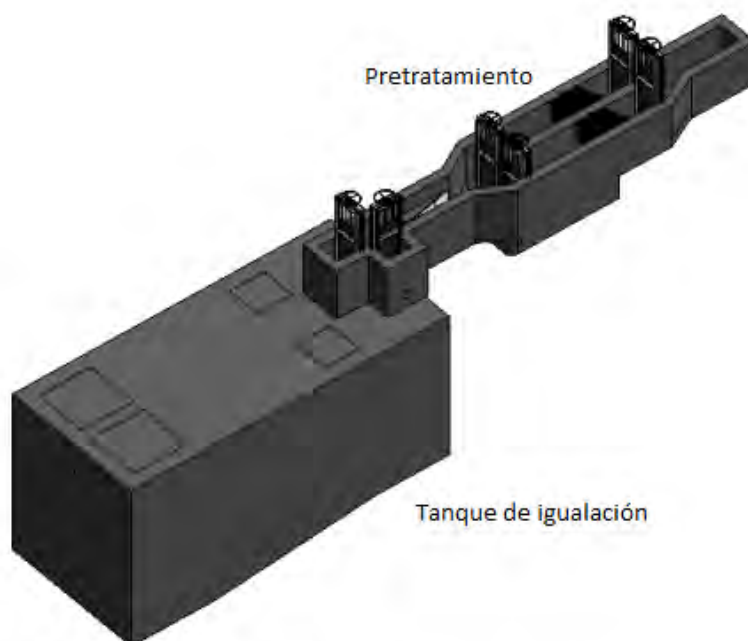


Figura 69: Canal de entrada y pretratamiento de las aguas residuales.

Como se aprecia en la Figura 69 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 18 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 1,40 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 hacía 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 69 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 70.

Para el cálculo del reactor anaerobio el factor importante a tener en cuenta es el tiempo de retención hidráulico, para garantizar que las bacterias conteni-

das 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.

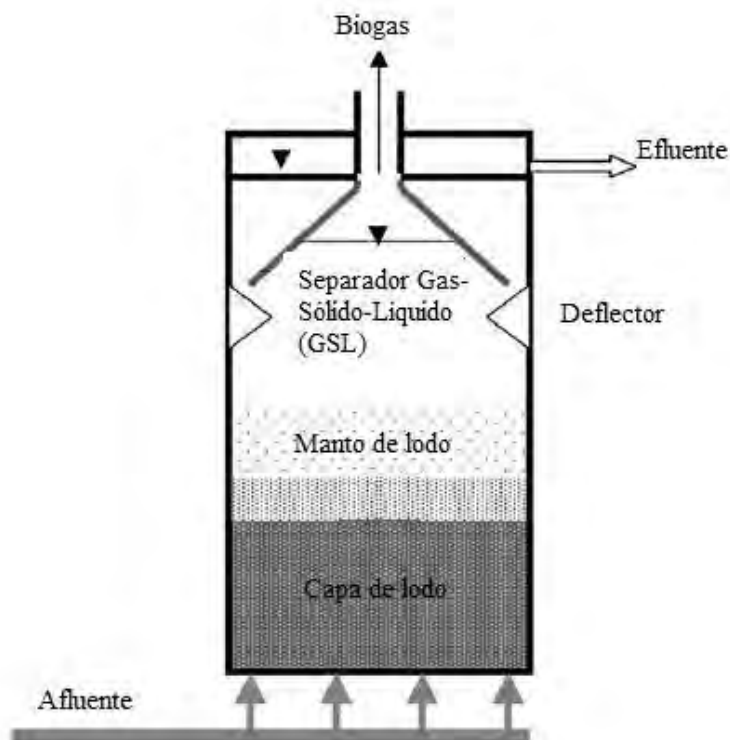


Figura 70: Esquema del reactor UASB.

Se realiza así el diseño de dos estructuras de tratamiento biológico anaerobio tipo UASB, estructuras de geometría circular de diámetro de 2,10 m y altura total de 6,0 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 1,40 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 $20,78 \text{ m}^3$ 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 71), 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.

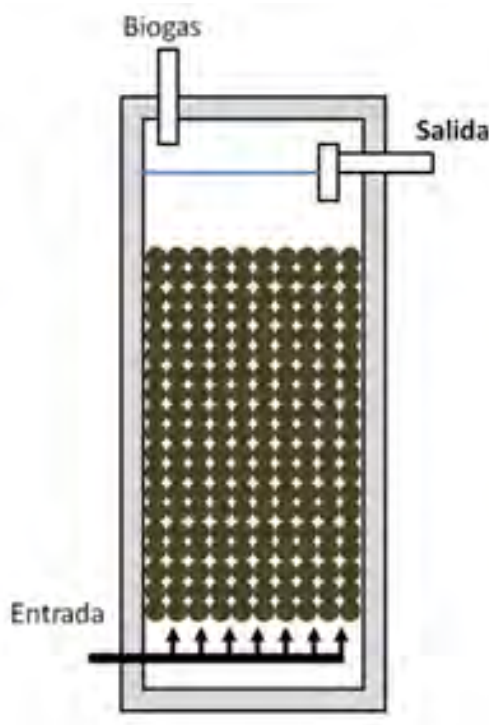


Figura 71: Esquema del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA).

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 $6,28/\text{m}^3$. 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 1,60 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 escapan de los reactores biológicos y para mejorar la calidad del clarificado del efluente de los reactores, en ellos el proceso físico que se lleva a cabo es la decantación y/o floculación de las partículas biológicas, el diseño de un Sedimentador secundario se complementa con paneles de Tasa Alta, que mejoran los rendimientos de remoción en áreas menores (Figura 72).

Los sedimentadores, dos unidades en PRFV se diseñan para una caudal proveniente de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA) de 1,40 l/s, en ellos se realiza entonces la decantación de los sólidos suspendidos en el agua.

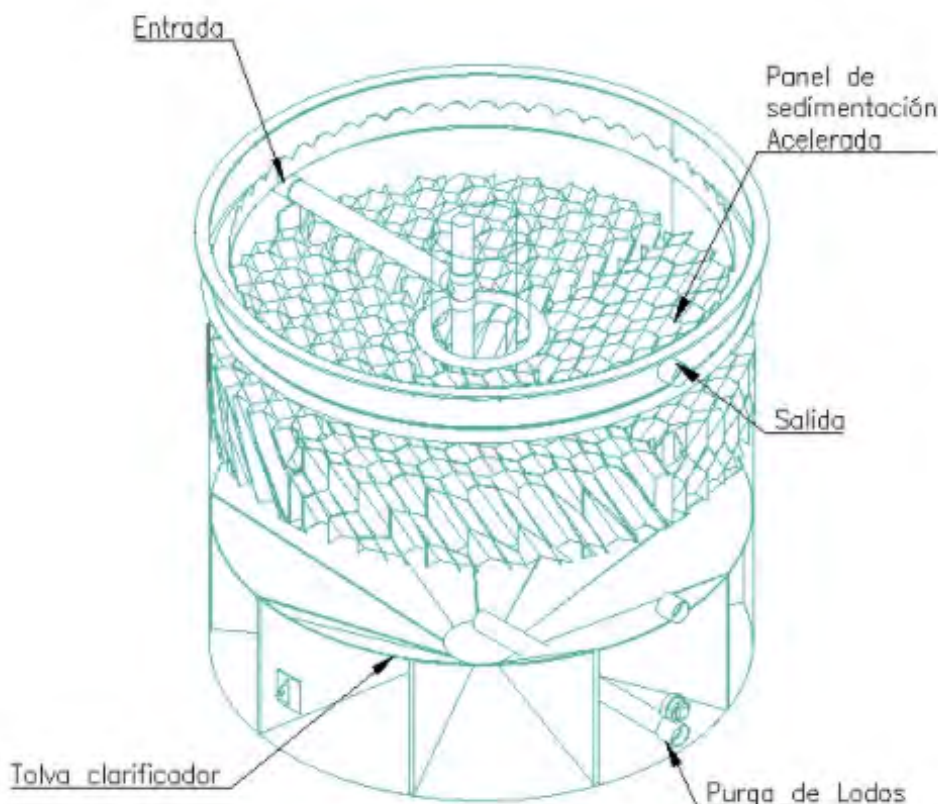


Figura 72: Modelo del Sedimentador Secundario con paneles de tasa alta.

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 0,6 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 $0,05 \text{ m}^3$ de lodos al día, los cuales serán purgados diariamente a los lechos de secado para realizar el tratamiento de lodos generados dentro de la planta.

7.2.6. Canal de salida y aforo

El canal de salida es propuesto para realizar el control de caudal de salida al 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 (1,40 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 (1,40 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 33 dando cumplimiento a las concentraciones requeridas para descarga en cuerpo de agua según la Resolución 0631 de 2015.

Tabla 33: Concentración de parámetros en el agua de salida de la planta.

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

7.2.7. Estructura de descarga

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

7.3. Tren de tratamiento de lodos

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

7.3.1. Deshidratación de lodos

La deshidratación de los lodos provenientes de los sistemas de tratamiento se realiza mediante lechos de secado, donde se busca reducir el contenido de agua en el lodo a menos de un 10 %. El volumen de lodos a deshidratar diariamente es de $0,14/m^3/día$, 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 2,0 m, un esquema de estos se presenta en la Figura 73.

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

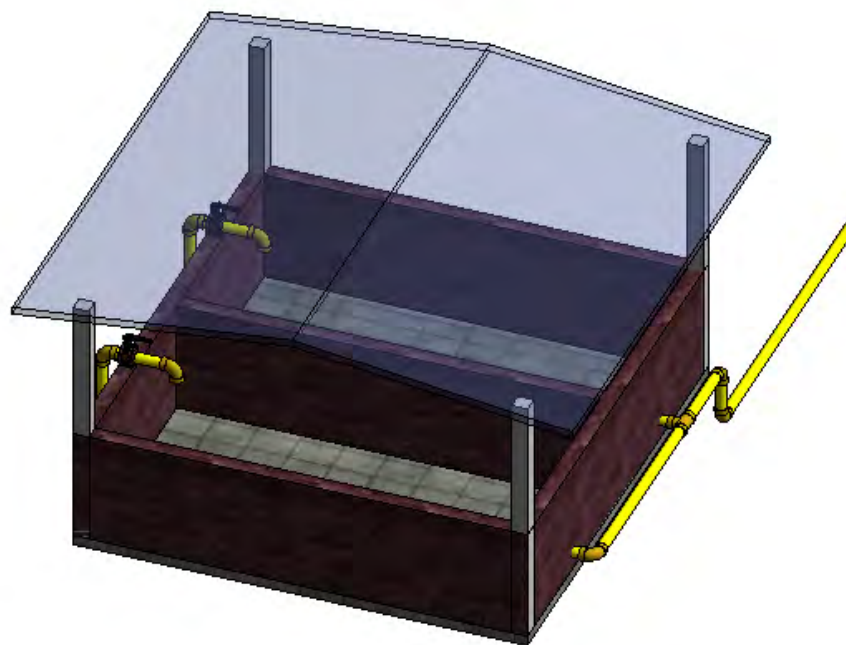


Figura 73: Esquema de los lechos de secado.

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 74.

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.

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

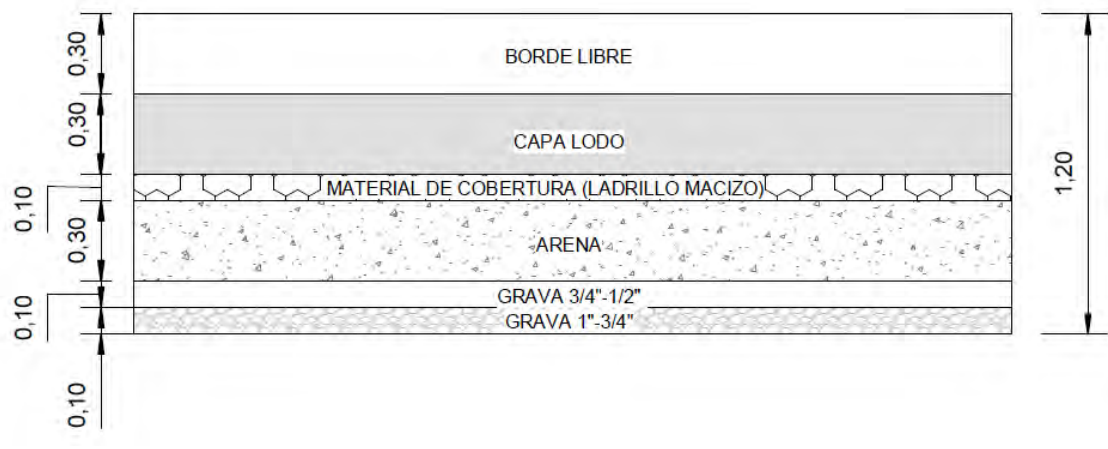


Figura 74: Estratificación de la estructura del lecho de secado (medidas en metros).

queda a elección. Se recomienda el reúso de los biosólidos como compostaje para zonas verdes. Al día se producen 5,70 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.

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

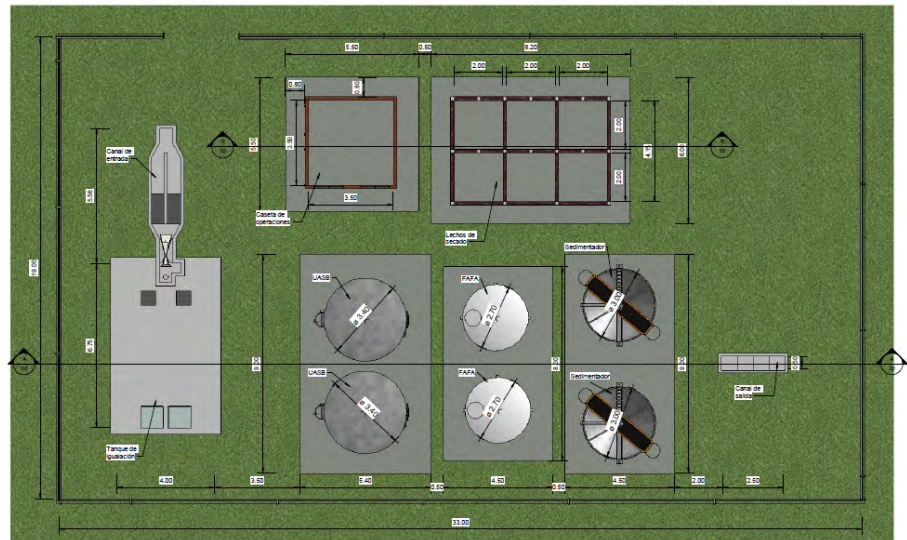


Figura 75: Vista en planta de la distribución propuesta en la PTAR.

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 76 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.
- 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.

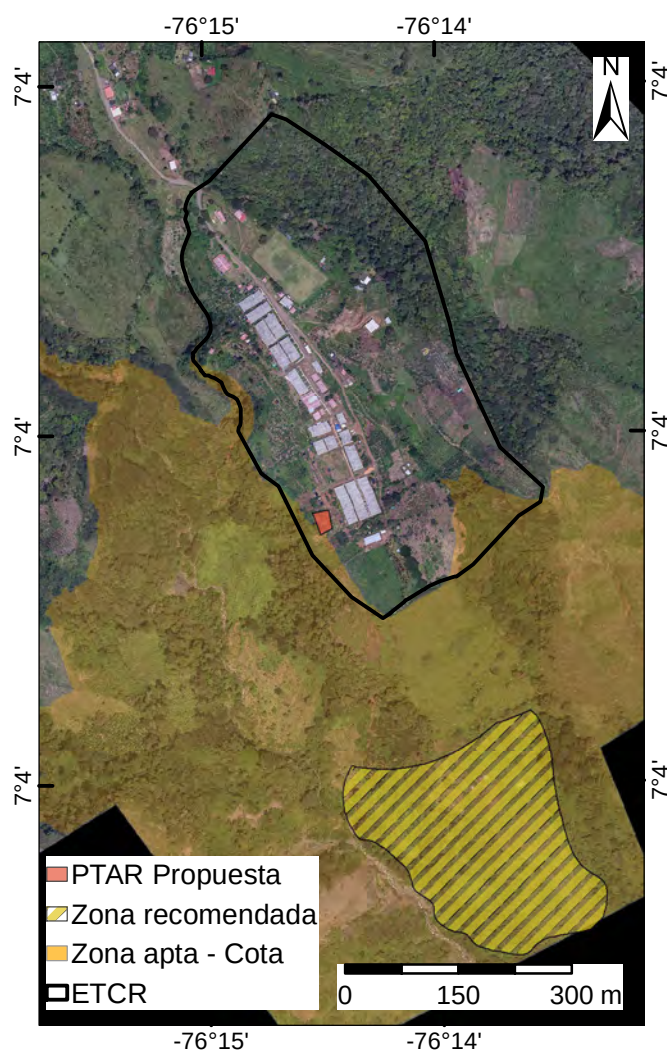


Figura 76: Alternativas de ubicación adicional para PTAR

- 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 amenaza y susceptibilidad por movimientos en masa plancha 114-Dabeiba (SGC, 2015):** mapa realizado por el Servicio Geológico Colombiano a escala 1:100.000 utilizando metodologías heurísticas. Se observa en la Figura 77b que la gran mayoría de la zona está clasificada como susceptibilidad alta y media, la parte oeste de la cuenca se encuentra clasificada como alta a excepciones de algunos lugares incluyendo el predio del antiguo ETCR que esta clasificado como susceptibilidad media, la parte este de la cuenca está clasificada como media en mayor proporción y algunos lugares como alta. Se observa en la Figura 77a que las zonas de amenaza muy alta (color rojo) se encuentran en la parte norte de la cuenca y las zonas de amenaza alta (color anaranjado) se encuentran en la parte baja o zona sur de la cuenca incluyendo el predio del antiguo ETCR.
- **Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa en el municipio de Dabeiba (Corpourabá, 2010):** mapa realizado en el Plan Básico de Ordenamiento Territorial para el municipio de Dabeiba año 2010, a escala 1:100.000. Se observa en la Figura 78 que la zona este y norte de la cuenca la clasificación de la susceptibilidad es muy alta, esto difiere con el mapa anterior de susceptibilidad del SGC (2015) que lo clasifica como medio y alta. En la parte oeste de la cuenca está clasificado en mayor proporción como susceptibilidad alta y en la zona del predio del antiguo ETCR está clasificado como medio.

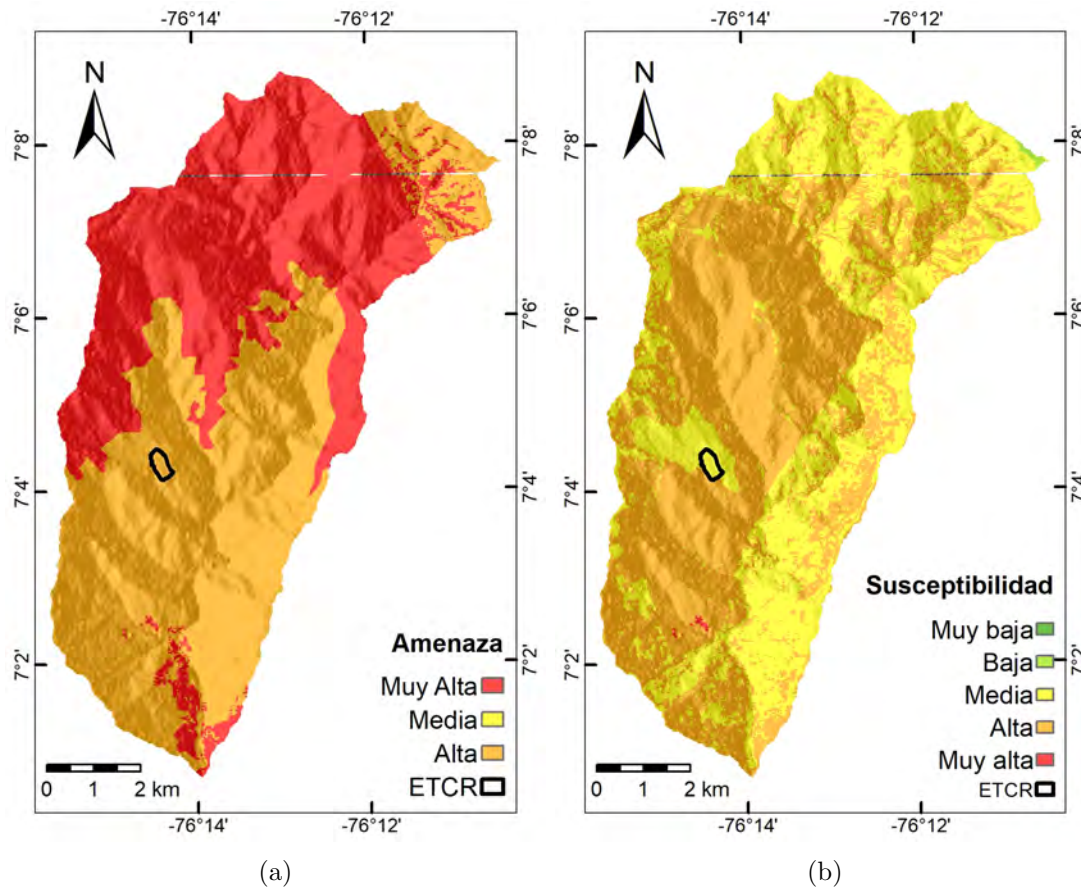


Figura 77: a) Mapa de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC. b) Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa escala 1:100.000 SGC.

8.3. Definición del área de influencia

Para la elaboración de los estudios básicos de amenaza por movimientos en masa inicialmente se procedió a definir un área de influencia con comportamiento geomecánico independiente y que enmarcara el predio del antiguo espacio territorial Llano Grande. 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 son establecidos inicialmente utilizando los cambios definitivos de pendiente, tales como cuchillas y drenajes.

Esta área es posteriormente ajustada considerando las unidades geológicas superficiales y estructuras. La Figura 79 presenta el área de influencia por movimientos en masa para el antiguo ETCR Llano Grande.

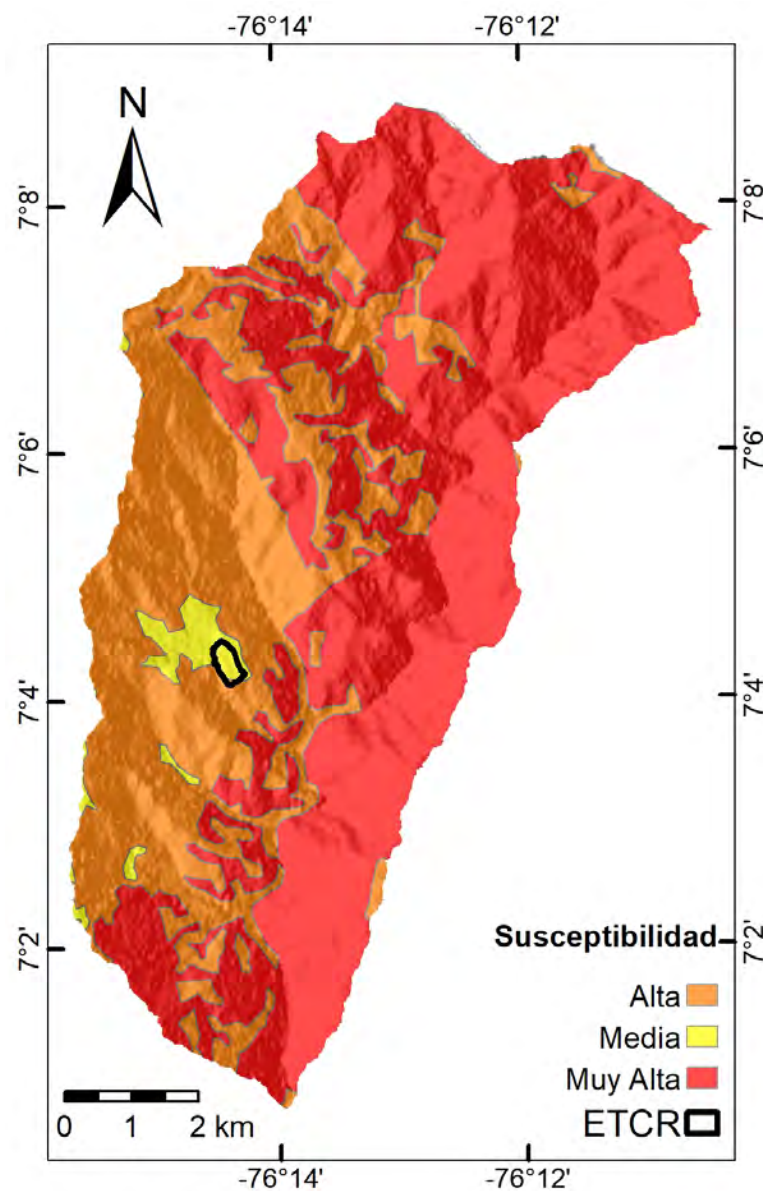


Figura 78: Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa PBOT Dabeiba, 2010

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, y (ii) fotointerpretación. A continuación se describe cada uno de los procedimientos desarrollados y los resultados obtenidos.

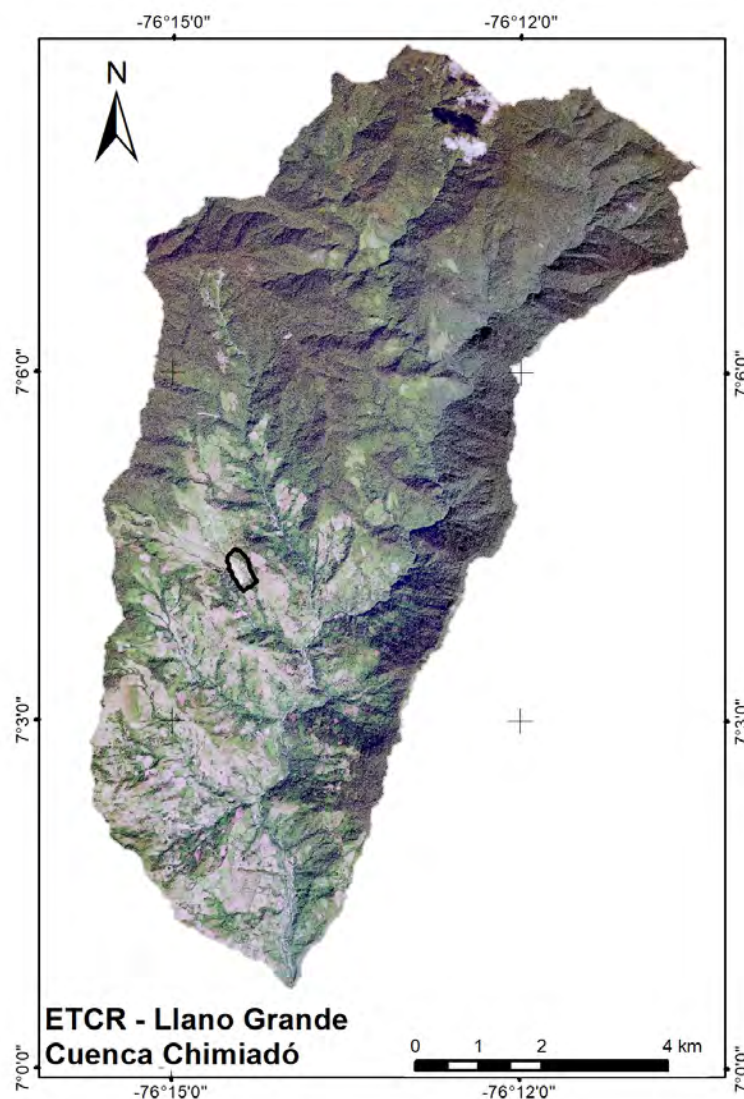


Figura 79: Área de influencia para la evaluación de la amenaza en el antiguo ETCR Llano Grande

8.4.1. Catálogo histórico de eventos

La realización del inventario histórico de movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones, toma como base de datos los registros disponibles para el municipio de Dabeiba en las plataformas del Sistema de Inventario de Desastres (DesInventar) y el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA), con el fin de dar una mirada en la morfodinámica regional asociada al antiguo ETCR Llano Grande. El presente documento presenta una sección con el catálogo histórico de eventos de acuerdo al fenómeno estudiado en cada capítulo: Capítulo 8 - Movimientos en masa, Capítulo 10 - Avenidas torrenciales y Capítulo 9.3 - 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 iniciado por 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) (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 así como el inventario de desastres de Antioquia con información desde el año 1903.

Por su parte el SIMMA es un sistema de información dinámico desarrollado por el Servicio Geológico Colombiano 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 1971 y el primer semestre del año 2020, el municipio de Dabeiba registró en el catálogo del DesInventar 43 eventos clasificados como movimientos en masa, los cuales representan el evento de mayor frecuencia con un porcentaje de 56,6 % de los reportes (teniendo en cuenta solo eventos tipo movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales) y tiene como causa principal las lluvias. Estos han dejado como saldo 38 personas fallecidas y han afectado a 30 personas.

Así mismo en el catálogo del SIMMA se registran 50 eventos de movimientos en masa durante el periodo comprendido entre 1992 y el primer semestre del año 2020. La Figura 80 representa la distribución espacial de los registros en este último catálogo. Ninguno de los eventos históricos se localiza dentro del antiguo ETCR, solo un reporte se ubica en la parte sur del área de influencia del antiguo ETCR.

Por otro lado en documentos relacionados con la planificación del territorio como Corpourabá (2010, 2019); SGC (2013), se resalta el deslizamiento de el Revenidero ocurrido el 25 de octubre de 1970, el cual provocó el represamiento del río Sucio (Caballero Acosta, Mejía Peláez, y (SGC), 1992), una vez que se rompió la presa, se generó un flujo de carácter torrencial que ocasionó la afectación de las partes bajas del municipio de Dabeiba.

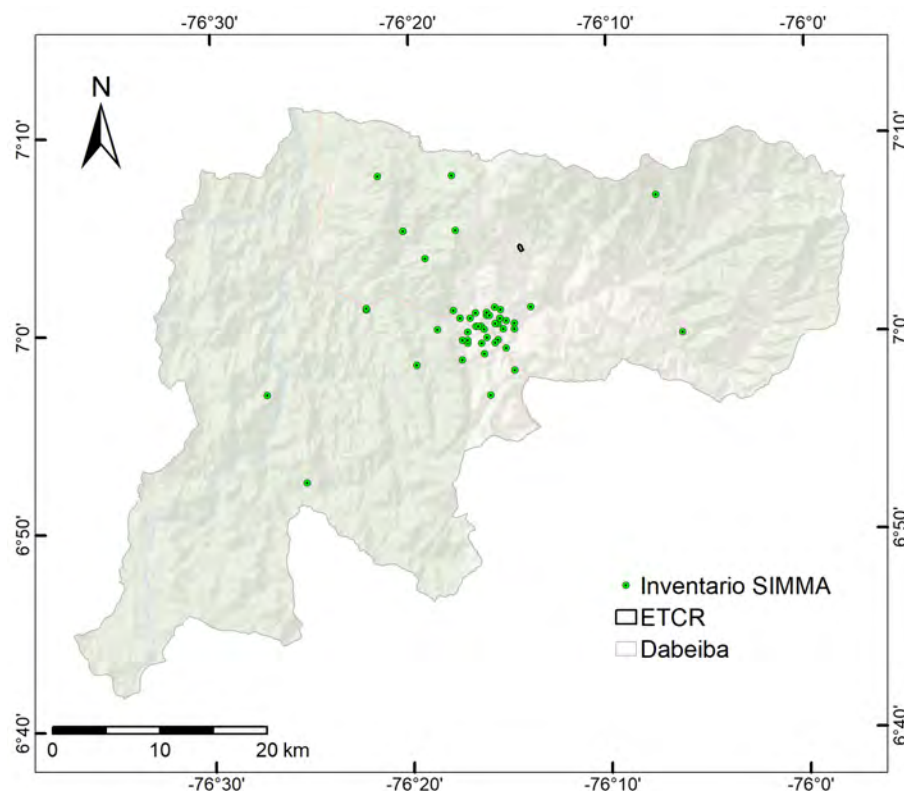


Figura 80: Distribución espacial de movimientos en masa en el municipio de Dabeiba registrados en el catálogo SIMMA

8.4.1.1. 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 Servicio Geológico Colombiano 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 por movimientos en masa.

La elaboración de este inventario utiliza como insumos, el modelo de sombras a partir del DEM de *ALOS PALSAR*, la capa raster con información de las pendientes e imágenes satelitales desde el año 2016 hasta el año 2019 del proveedor *ESRI* en la plataforma *World Imagery* con resolución submétrica.

El proceso de fotoanálisis se enfocó en delimitar los procesos morfodinámicos presentes en el área de influencia. Se identifican movimientos en masa clasi-

ficándolos en activos e inactivos, así mismo se identifican depósitos de vertiente, depósitos aluviales y aluvioterrenciales (Figura 81) considerados como sedimentos disponibles y que pueden complementar el mapa de unidades geológicas superficiales para la zona.

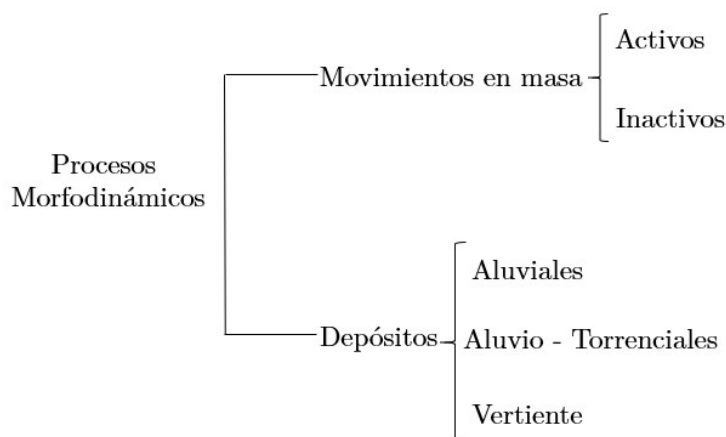


Figura 81: Clasificación utilizada en la identificación de procesos morfodinámicos

En la Figura 82 se presentan los elementos asociados a los procesos morfodinámicos que se capturan durante el proceso del fotoanálisis sobre la cuenca de la quebrada Chimiadó.

En el área de la cuenca Llanogrande (tributario de la quebrada Chimiadó), predominan los movimientos en masa activos y se concentran hacia el final de la cuenca, sobre el costado derecho aguas abajo del drenaje principal. Los depósitos que predominan en la cuenca en términos de área son los del tipo aluvio-torrencial ocupando el 0,6 % del área de la cuenca.

Por su lado en el área de la cuenca de la quebrada Chimiadó se identifican 161 movimientos en masa, 95 activos (59 %) y 66 inactivos (41 %) (ver Tabla 34). Los movimientos en masa activos se concentran en las partes altas de las subcuencas hacia el norte de la cuenca, mientras que en las subcuencas hacia el sur de la cuenca, los movimientos en masa se presentan en las partes medias de estas. En relación a los depósitos identificados, los de tipo aluvio-torrencial son los más representativos con un 50,3 % del total en términos de área, seguido por los de vertiente (29,4 %) y finalizando con los de tipo aluvial (20,3 %) (ver Tabla 34). La mayor concentración de depósitos aluvio-torrenciales se presenta en las desembocaduras de la quebrada Llanogrande y el cauce más próximo hacia el norte (ver Figura 82). Con respecto al área total de la cuenca de la quebrada Chimiadó, este tipo de depósito representa el 0,13 % del área.

Tabla 34: Procesos morfodinámicos presentes en la cuenca de la quebrada Chimiadó

Proceso	Tipo	%
Movimientos en masa	Activo	59
	Inactivo	41
Depósitos	Aluvial	20,3
	Aluvio-Torrencial	50,3
	Vertiente	29,4

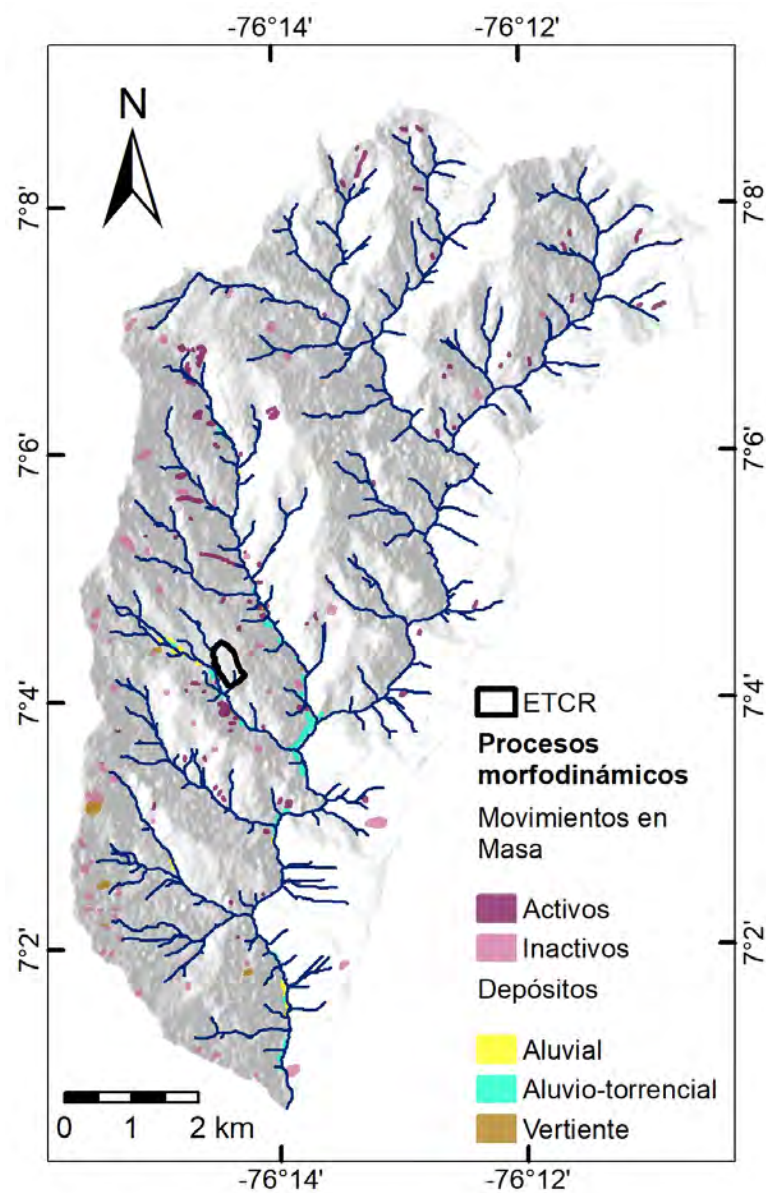


Figura 82: Inventario procesos morfodinámicos Llano Grande - cuenca quebrada Chimiadó

Considerando la presencia exclusiva de movimientos tipo deslizamientos y flujos, debido a la presencia dominante de laderas en suelos *insitu* o transportados, la susceptibilidad por movimientos en masa se concentra en la ocurrencia de movimientos en masa tipo deslizamientos y flujos. Zonas de caída y/o volcamiento se observaron en la zona de estudio, pero estos se presentan asociados a los cortes de la vía donde aflora la roca.

8.5. Evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa

La susceptibilidad es el primer acercamiento a la evaluación de amenaza, dado que zonifica el terreno de acuerdo a la posibilidad de que una ladera falle. La susceptibilidad por movimientos en masa se define como la probabilidad de la ocurrencia en un área específica de acuerdo con las condiciones intrínsecas de terreno, donde factores detonantes (precipitación o sismo) no son considerados en su análisis (Brabb, 1985; Soeters y Van Westen, 1996). Considerando la existencia del inventario de movimientos en masa, se utiliza en el presente estudio métodos estadísticos para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa. Dentro de los modelos estadísticos existe una amplia cantidad de modelos, los cuales se clasifican en métodos bivariados 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.

En primera instancia se implementó un método estadístico bivariado, denominado Peso de la Evidencia (Van Westen, 1993), recomendado por el SGC (2015) para suelos rurales. Sin embargo, considerando la limitación de este tipo de métodos bivariados, los cuales solamente permiten asignar peso a las clases que conforman las variables, se optó por combinarlo con un método heurístico denominado Análisis Jerárquico de Procesos (AHP por sus siglas en inglés) (Saaty, 1980), el cual permite adicionalmente asignarle peso a las variables, obteniendo una ecuación para el índice de susceptibilidad de la forma:

$$IS = AHP_1 * X_1(WoE) + AHP_2 * X_2(WoE) + ... + *X_n(WoE) \quad (8.1)$$

Donde (IS) es el índice de susceptibilidad, (AHP) es el peso asignado a cada variable (X) y WoE corresponde al peso dado a cada clase por el método peso

de la evidencia.

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).

En segunda instancia se implementó el método estadístico multivariado: Regresión Logística que corresponde al modelo mas utilizado a nivel mundial.

En cuanto a la definición del conjunto de variables predictoras que mejor expliquen la ocurrencia de movimientos en masa en el área de influencia, se analizó un abanico amplio de variables utilizadas y recomendadas en el estado del arte. Estas variables fueron estimadas para el área de influencia establecida inicialmente, y se eliminaron aquellas variables correlacionables y que aportaran al modelo información similar. Finalmente se utilizó la Curva de Éxito para evaluar, tanto el desempeño como la capacidad de predicción de cada uno de los modelos y seleccionar el mejor de ellos.

A continuación se describe el procedimiento metodológico implementado para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa y resultados obtenidos.

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.

En cuanto al área mínima cartografiable, esta 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 pixeles, es decir $10,000 m^2$. Considerando que la mayoría de las variables se derivaron del MDE e imágenes satelitales se consideró suficiente un número mínimo de 16 celdas para detectar e identificar los diferentes elementos, lo cual equivale a la resolución espacial equivale a 2 mm x 2 mm, y $2,500 m^2$ 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 el mapa de susceptibilidad, de tal forma que no se sumaran los ajustes realizados a cada variable.

8.5.2. Variables predictoras

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

8.5.2.1. Inclinação de la ladera (IL)

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

8.5.2.2. Pendiente (S)

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

8.5.2.3. Relieve relativo (RR)

Se define como la diferencia entre la mayor elevación y la menor elevación por unidad de área y se expresa como la máxima diferencia de altura del terreno

por metros (SGC, 2013).

8.5.2.4. Rugosidad (Rug)

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

8.5.2.5. Índice de humedad topográfica (TWI)

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

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

Donde As es el mapa raster de acumulación de flujo y $\tan(slope)$ 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 83 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 84 muestra los resultados para el área donde se resaltan las variables EAS, DDS, IL, S y TPI, quienes muestran relaciones con valores superiores a 0,7, 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)
- Pendiente (S)
- Distancia a Fallas (DF)
- Mapa Cinemático (Cin)
- Distancia al drenaje siguiendo la pendiente (DDS)
- Relieve Relativo (RR)

Con estas variables seleccionadas se implementó el método AHP para asignarle pesos. El método AHP 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 35. Para diligenciar la matriz de comparación de Saaty se conformó una mesa técnica con

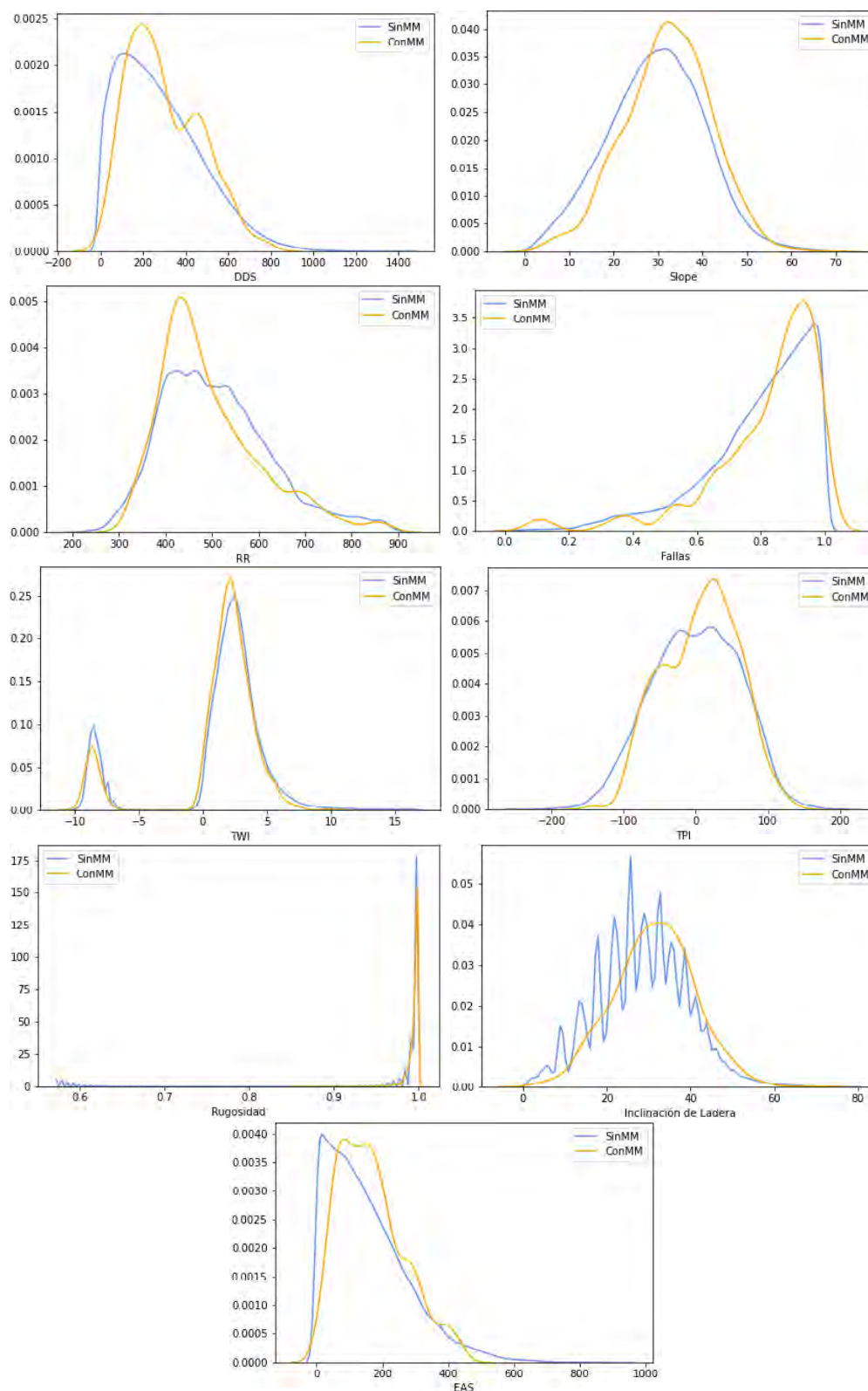


Figura 83: Histograma de frecuencia de Kernel con la densidad de probabilidad para las variables continuas analizadas

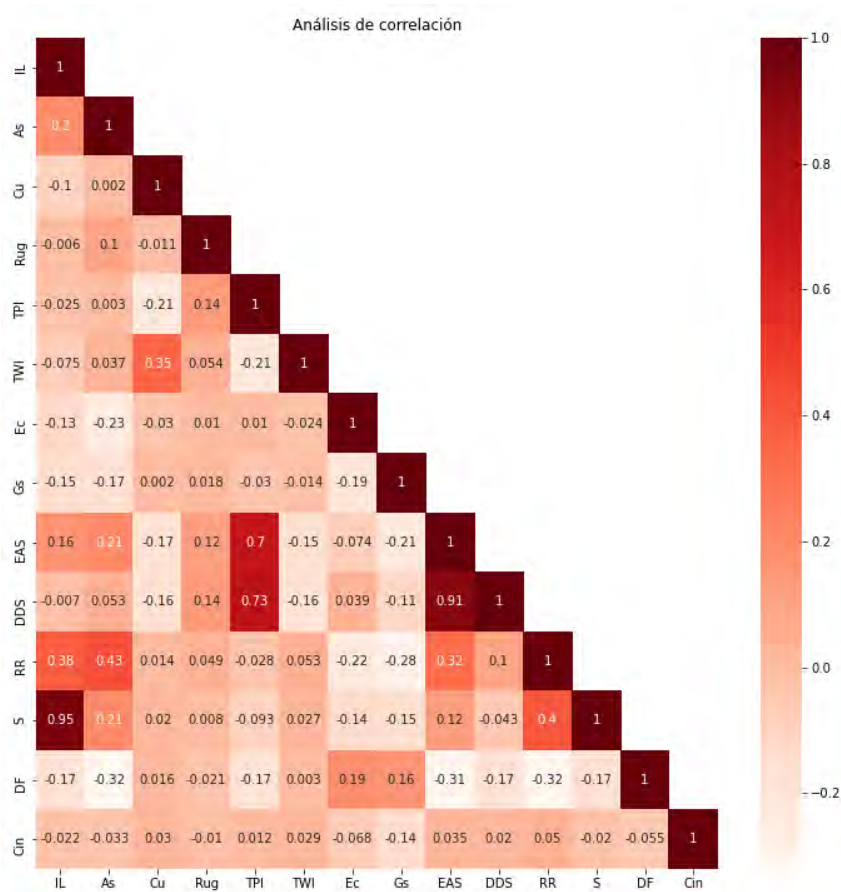


Figura 84: Matriz de correlación

todos los ingenieros geólogos e ingenieros civiles del equipo. Los valores asignados por cada ingeniero fueron sumados y se obtuvo una media ponderada de acuerdo con la experiencia de cada profesional. De acuerdo con la metodología de AHP, a partir la matriz de comparación se estima el vector de peso prioritario normalizado, que corresponde al vector asociado al mayor valor propio de la matriz de comparación.

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

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (8.3)$$

Donde λ_{max} es el máximo valor propio y n el orden de la matriz. El IC puede variar 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

Tabla 35: 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

aceptables (Ayalew, Yamagishi, y Ugawa, 2004; Saaty, 1980).

La Tabla 36 presenta la calificación ponderada realizada para cada variable. La Tabla 37 presenta los pesos finales de cada variable. El índice de consistencia (*IC*) obtenido para la matriz ponderada es de 0,034, lo cual señala una evaluación coherente.

Tabla 36: Matriz de calificación AHP

	S	Cin	Cu	RR	DF	DDS	Ec	Gs
S	1	3	3	3	5	3	5	3
Cin	1/3	1	3	1/3	1/5	7	1/5	1/5
Cu	1/3	1/3	1	1/3	1/7	5	1/5	1/5
RR	1/3	3	3	1	3	7	1/3	1/3
DF	1/5	5	7	1/3	1	5	1	1/3
DDS	1/3	1/7	1/5	1/7	1/5	1	1/5	1/5
Ec	1/5	5	5	3	1	5	1	1/3
Gs	1/3	5	5	3	3	5	3	1

Tabla 37: Pesos de las variables seleccionadas con el peso asignado para el antiguo ETCR Llano Grande

Mapa	Peso %
Pendiente (S)	28,5
Cinematico (Cin)	6,9
Curvatura (Cu)	4,8
Relieve Relativo (RR)	11,7
Distancia de Fallas (DF)	11,6
Distancia al drenaje mas cercano siguiendo la pendiente (DDS)	2,9
Evolucion de la cobertura (Ec)	13,7
Geología superficial (Gs)	19,9

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:

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

Dónde $A1$ es el número de pixeles con movimientos en masa en la clase, $A2$ número de pixeles con movimientos en masa que no están presentes en la misma clase, $A3$ número de pixeles en la clase que no hay movimientos en masa y $A4$ es el número de pixeles 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 el área de influencia para la evaluación de amenaza en el antiguo ETCR Llano Grande, corresponden a rocas del Complejo Cañasgordas y depósitos cuaternarios (INGEOMINAS, 2010), ambos alterados y afectados por procesos tectónicos y de meteorización (Figura 85).

Diabasas y basaltos (JRK1du)

La unidad de diabasas y basaltos (JRK1du), asociados a las Diabasas de San José de Urama y a la Formación Barroso (INGEOMINAS, 2010) está compuesta por cuerpos que afloran en la plancha constituidos por diabasas y en menor proporción por basaltos. Los afloramientos en campo se observan sobre el costado izquierdo de la vía que conduce desde el municipio de Dabeiba hacia la vereda Llano Grande, en la zona más al sur de la cuenca. La roca es de color gris y gris verdoso, fanerítica fina a muy fina, densa, con algunas zonas de color gris claro y textura típica de diabasas de acuerdo al tamaño de grano de la roca en el afloramiento. Generalmente están compuestas por cristales de plagioclasa menores de 1 mm, de color verde claro y un mineral máfico negro (piroxeno), predomina la plagioclasa sobre el piroxeno, localmente presentan sulfuros como piritita y pirrotina diseminada en contenidos menores al 1 %. Con frecuencia se desarrollan patinas de color negro y gris azul de óxidos de manganeso en las diaclasas y fracturas de la roca o al interior de las rocas como alteración de los máficos dando tonalidades naranjas. (Figuras 86 y 87)

Los perfiles de meteorización desarrollados por esta unidad en el área de la cuenca, son descritos según la estructura planteada por Dearman (1974), identificándose los horizontes I, II, III, y VI. A continuación se describen y muestran cada uno de estos:

- **Roca con alteración (II):** este horizonte posee una textura clasto-soportada con una relación 80/20 de bloque/matriz, seco, con un espesor de 1,5m, con presencia de fisuras. La matriz es de color crema, mientras que los clastos son de color gris oscuro, con formas tabulares, subangulares y con un grado de meteorización alta. Figura 88)
- **Predomina roca sobre matriz (III):** este horizonte posee una textura

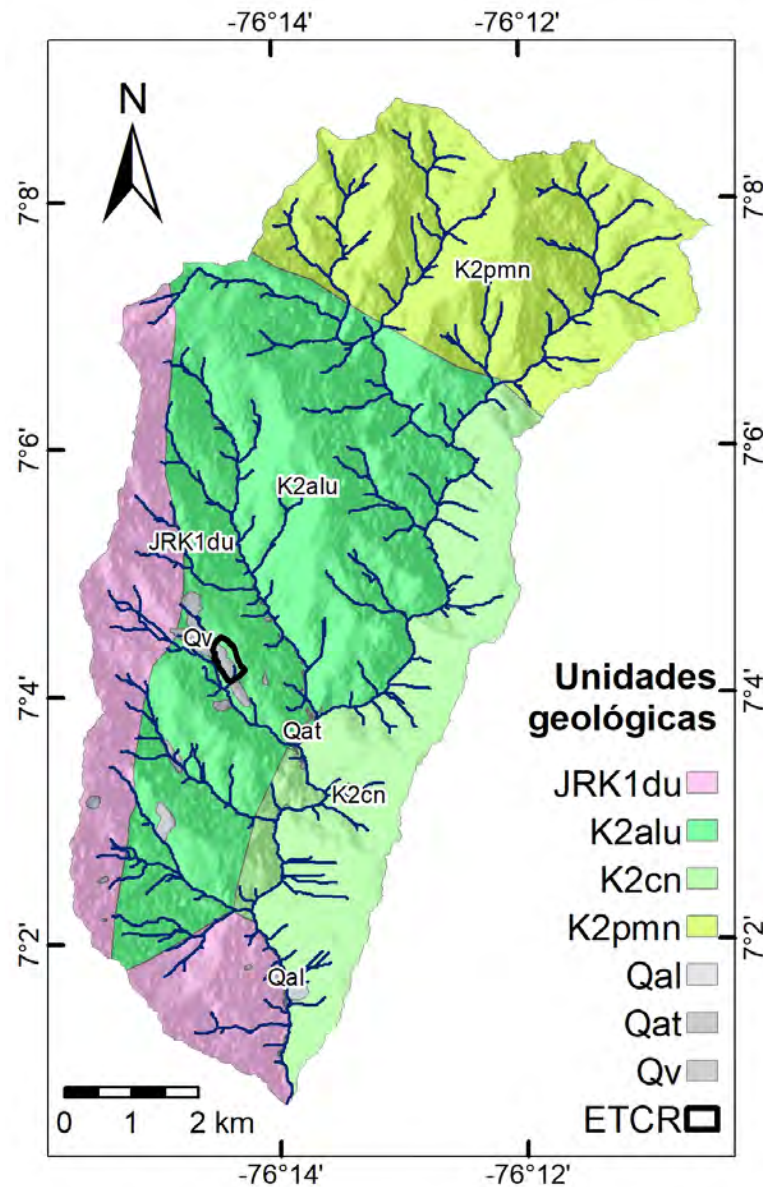


Figura 85: Mapa de unidades geológicas superficiales en el área de influencia para la evaluación de amenaza en el antiguo ETCR Llano Grande

clasto-soportada con una relación 70/30 de bloque/matriz, seco, con un espesor de 90cm. La matriz es de color pardo claro, conformada por grava (40 %), arena media (15 %), arena gruesa (20 %), limo (20 %) y arcilla (5 %), su plasticidad y consistencia es baja. Por su lado los clastos son de color gris, prismáticos, subangulares con mientras que los clastos son de color gris oscuro, con formas tabulares, subangulares y con un grado de meteorización alta. (Figura 89)

- **Suelo residual (VI):** este horizonte posee una textura limoarenosa, húme-

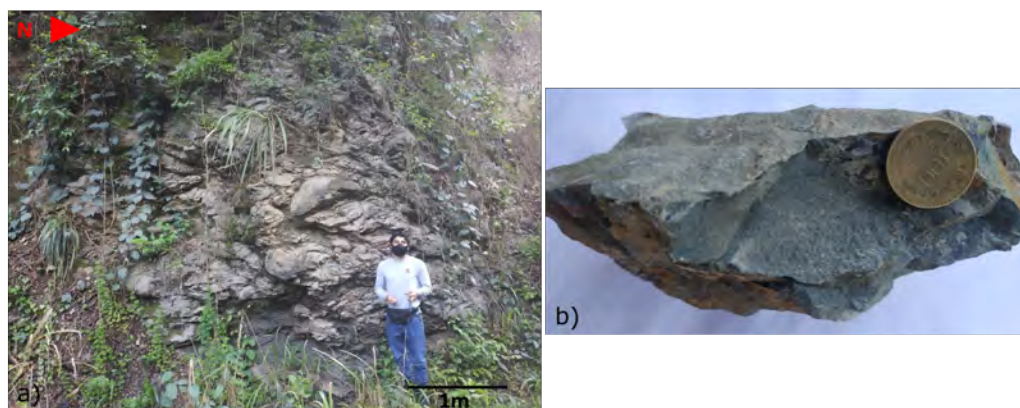


Figura 86: Unidad de basaltos. a) Afloramiento costado izquierdo de la vía hacia la vereda Llano Grande (horizonte I). b) Basalto en muestra de mano



Figura 87: Unidad de diabasas. a) Afloramiento de roca fresca a alterada con algunas fisuras (horizonte I). b) Diabasa en muestra de mano. c) Pátinas de óxido en muestra de diabasa

da, con un espesor de 50cm. La matriz es de color café, conformada por grava (20 %), arena media (20 %), arena fina (20 %), limo (30 %) y arcilla (10 %), su plasticidad es media-alta y su consistencia es media. (Figura 90). Esta unidad presenta movimientos en masa sobre la vía, de tipo rotacional, así mismo estos cuerpos se encuentran intensamente fracturados y deformados, siendo frecuentes las zonas de fallas en los bordes de cada cuerpo. Esta unidad en el área de estudio se encuentra afectada por la presencia



Figura 88: Perfil de meteorización unidad de basaltos y diabasas: Horizonte II



Figura 89: Perfil de meteorización unidad de basaltos y diabasas: Horizonte III

de una falla hacia el norte de este bloque, la cual ocasiona que esta unidad adopte una estructura esquistosa y foliada de color verdosa a gris verdosa, con tacto sedoso altamente fisible por los planos de esquistosidad (Figura 91). Esta roca dinámica, hacia el norte va adoptando un color más oscuro,



Figura 90: Perfil de meteorización unidad de basaltos y diabasas: Horizonte VI

lo cual puede asociarse con el miembro Urrao de la Formación Penderisco, igualmente afectada por la actividad dinámica de las fallas en la zona.

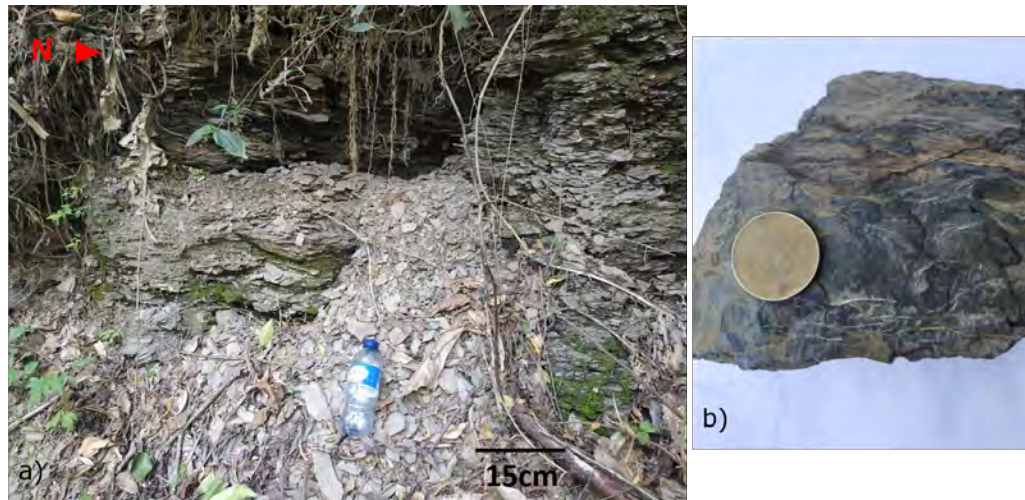


Figura 91: Unidad de basaltos y diabasas afectados dinámicamente, generando milonitas o filonitas. a) Afloramiento de roca altamente fisible. b) Muestra de mano de milonita apartir de la unidad de basaltos y diabasas

Formación Penderisco - Miembro Urrao (K2alu)

Esta unidad abarca la mayor parte del área de estudio del costado derecho de la quebrada Chimiadó. Está conformado por bloques litológicos de

litoarenitas, lodolitas y limolitas. En la zona se presenta como rocas con esquistosidad pizarrosa de origen dinámico asociado a las fallas presentes en el área de estudio (INGEOMINAS, 2010). La roca es de coloración gris oscuro, con cambios en grados de foliación, es decir, en algunas zonas los planos de esquistosidad son menos desarrollados. Se presentan algunos afloramientos con plegamientos (Figura 92).

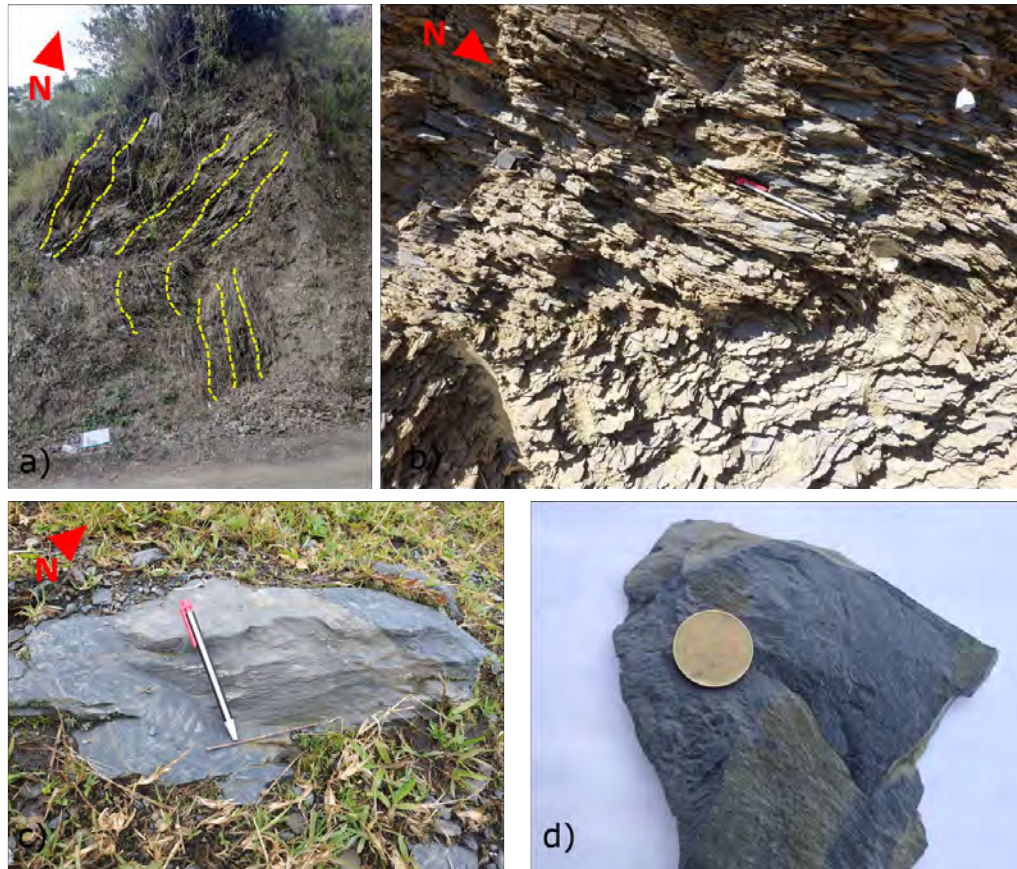


Figura 92: Miembro Urrao afectado por metamorfismo dinámico, generando milonitas o filonitas. a) Afloramiento de roca con plegamientos. b) Afloramiento de roca con planos de foliación bien definidos. c) Afloramiento de roca con planos de foliación menos desarrollados (horizonte I). d) Muestra de mano de milonita de coloración gris oscura a partir de rocas sedimentarias del Miembro Urrao

Los perfiles de meteorización desarrollados por esta unidad en el área de la cuenca, son descritos según la estructura planteada por Dearman (1974), identificándose los horizontes I, II, III, IV y V. A continuación se describen y muestran cada uno de estos:

- **Roca con alteración (II):** este horizonte posee un espesor de 1m, húmedo, con presencia de estructuras heredadas tipo foliación. El color de los

clastos son crema claro con zonas grises, con pátinas de óxido y raíces. Las formas son tabulares, angulares y con un grado de meteorización alta. (ver Figura 93)



Figura 93: Perfil de meteorización del Miembro Urrao: Horizonte II

- **Predomina roca sobre matriz (III):** este horizonte posee una textura clasto-soportada con una relación 80/20 de bloque/matriz, húmedo, con un espesor de 40cm. La matriz es de color café-pardo, conformada por grava (40 %), arena fina (10 %), limo (35 %) y arcilla (15 %), su plasticidad y consistencia es media. Por su lado los clastos son de color crema a gris, discoidales, subangulares y con un grado de meteorización alta. (Fig. 94)
- **Predomina matriz sobre roca (IV):** este horizonte posee una textura matriz-soportada con una relación 40/60 de bloque/matriz, húmedo a seco en el nivel superior, con un espesor de 2m, en donde aún se conservan estructuras. La matriz es de color pardo-rojiza a amarillo-crema, conformada por arena fina (20 %), limo (30 %) y arcilla (50 %), su plasticidad y consistencia es alta. Por su lado los clastos son de color verdoso oscuro, discoidales, angulares y con un grado de meteorización alta. (Figura 95)
- **Saprolítico (V):** este horizonte posee una textura matriz-soportada con una relación 40/60 de bloque/matriz, húmedo, con un espesor de 40cm. La matriz es de color pardo-rojiza a naranja, conformada por arena fina

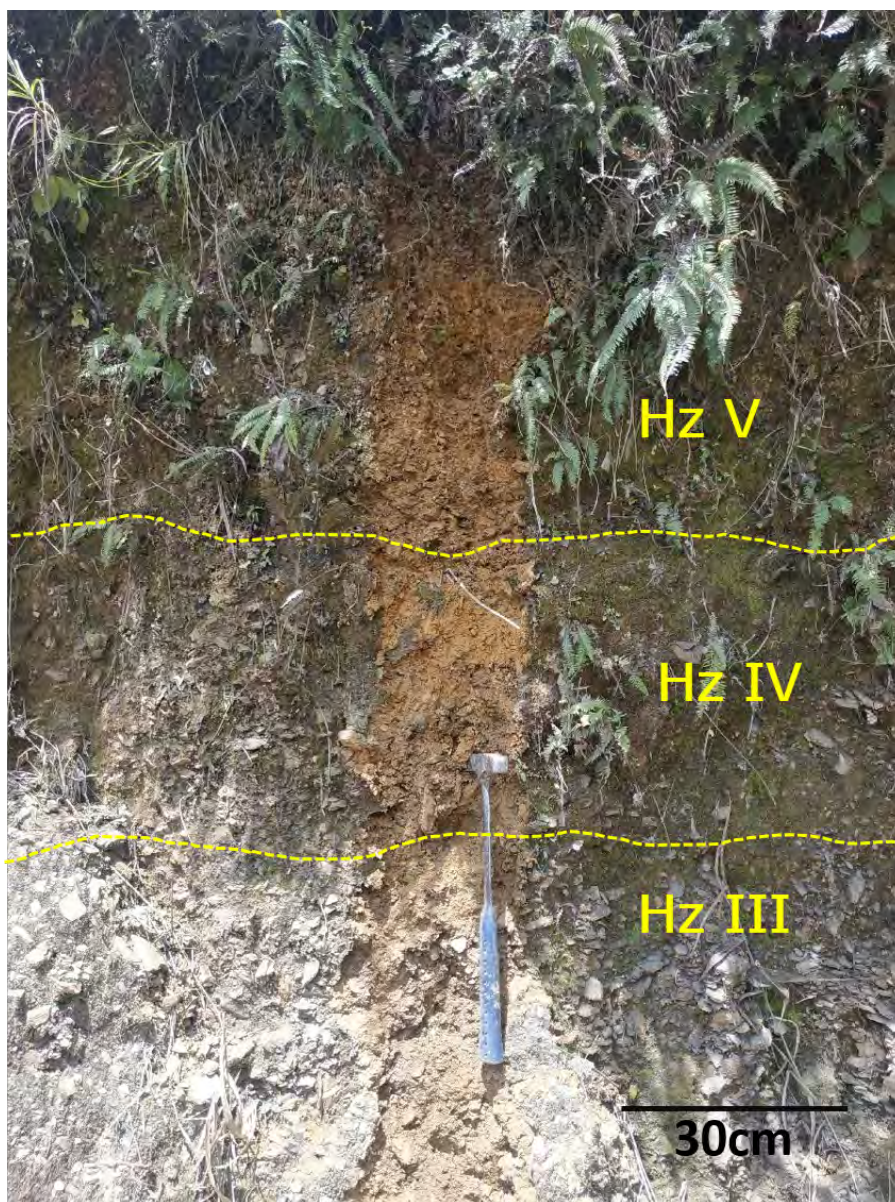


Figura 94: Perfil de meteorización Miembro Urrao: Horizonte III, IV y V

(10 %), limo (40 %) y arcilla (50 %), su plasticidad es alta y su consistencia es media. Por su lado los clastos son de color gris, discoidales, angulares y con un grado de meteorización moderada. (Figura 94)

En esta unidad predominan los movimientos en masa de tipo caída sobre la vía que conduce a la vereda Llano Grande, debido a la alta fragilidad de la roca y a los procesos de meteorización presentes en la zona. Estos procesos en época de invierno bloquean la vía.

Formación Penderisco - Miembro Nutibara (K2cn)



Figura 95: Perfil de meteorización Miembro Urrao: Horizonte IV

Su miembro calcáreo silíceo está compuesto por cherts negros con intercalaciones de calizas. Este se presenta finamente estratificado en gruesos paquetes de estratos donde alternan capas de 1 a 30 cm de chert negro con capas de pocos milímetros de sílice coloidal blanca; muy fracturado, diaclasado y replegado: Está asociado a derrames diabásicos, comúnmente se intercala con chert calcáreo sano, donde el chert negro se encuentra muy fracturado y con venas de calcita. Es de fracturamiento irregular y concoide, estratificación paralela laminar y con abundantes huellas de *Zoophicus* como marca del ambiente de formación marino profundo, además tiene piritita diseminada. Debido al denso fracturamiento, es difícil obtener muestras de tamaño decimétricos. Esta unidad

se encontró en el costado izquierdo de la quebrada Chimiadó, en la vereda La Mesa, en muestra de mano corresponde a un chert negro con costras y venillas de material calcáreo (Figura 96). De esta unidad no fue posible la caracterización del perfil de meteorización dada la dificultad de acceso a la zona. Presenta movimientos en masa inactivos latentes.



Figura 96: Muestra de mano de chert negro con costras y venillas calcáreas (Miembro Nutibara), en el costado izquierdo de la quebrada Chimiadó

Complejo Cañasgordas (K2pmn)

Esta unidad se obtiene de la plancha 114 Dabeiba (INGEOMINAS, 2010) en la cual se describe que este complejo está conformado por las Pizarras de Dabeiba, Diabasas de San José de Urama y por el Grupo Cañasgordas. Algunos tipos en específico de litologías que conforman este complejo, se encuentran dentro del área de estudio, pero desde la información base se desconoce el detalle de la litología en la zona más al norte de la cuenca, dada la dificultad en el acceso. En la visita de campo tampoco fué posible chequear dicha área por falta de accesibilidad, por lo cual se recomienda en futuros estudios lograr caracterizar esta porción de la cuenca.

Depósitos aluviales y aluviotorrenciales (Qal, Qat)

Los depósitos aluviales están asociados principalmente a la quebrada Chimiadó aunque los observados se atribuyen al de quebradas menores, mostrando material de tamaño guijos y gravas en su mayoría esféricos subredondeados en

una matriz de arena gruesa, en cercanía a la quebrada Chimiadó se observan pequeños depósitos con material tamaño arena gruesa y grava de color negro a gris oscuro con clastos en el lecho discoidales-redondeados (Figura 97).



Figura 97: Material que conforma los depósitos aluviales de la quebrada Chimiadó

Por su parte los depósitos de carácter aluviotorrencial asociados a este mismo afluente, se observaron en el costado derecho de la quebrada aguas abajo, su incisión es leve con presencia de coberturas con pastos altos y rastrojo, son matriz-soportados con una relación 40/60 de bloque/matriz, con moderada selección y forma de bloques esféricos subredondeados, de litología sedimentaria como areniscas, chert con presencia de carbonatos, con tamaños desde 20cm hasta 1m de color grisáceos, su meteorización es moderada, el ancho del depósito oscila entre los 10m y 20m. Cerca a la desembocadura de la quebrada Llanogrande en la quebrada Chimiadó, se observa también un depósito aluvial-aluviotorrencial asociado (Figura 98).

Depósitos de vertiente (Qv)

Los depósitos de vertiente presentes en la zona de estudio se observan sobre el costado oeste de la cuenca, en su mayoría sobre el Miembro Urrao. Estos poseen una relevancia vital, dado que el asentamiento del antiguo ETCR Llano Grande se encuentra parcialmente sobre un gran depósito (Figura 99).

El depósito de vertiente asociado al antiguo ETCR (Figura 100) está fuertemente incisado al este y oeste por dos afluentes, uno de ellos la quebrada Llanogrande, la cual desarrolla un cañón de aproximadamente 200m de profundidad.

Este depósito posee una cobertura de pastos, rastrojo y viviendas, con pendientes entre 5° y 10°, con suaves colinas a superficies planas. Presenta variaciones en las texturas siendo clasto-soportado (70/30) en unas zonas y matriz-



Figura 98: Depósitos aluviotorrenciales en el área de influencia para la evaluación de amenaza en el antiguo ETCR Llano Grande. a) Depósito aluviotorrencial con presencia de bloques de hasta 1m de diámetro en la parte sur de la quebrada Chimiadó. b) Composición de algunos de los bloques: chert con bandas calcáreas. c) Depósito aluviotorrencial hacia el norte de la quebrada Chimiadó. d) Depósito aluviotorrencial de la quebrada Llanogrande

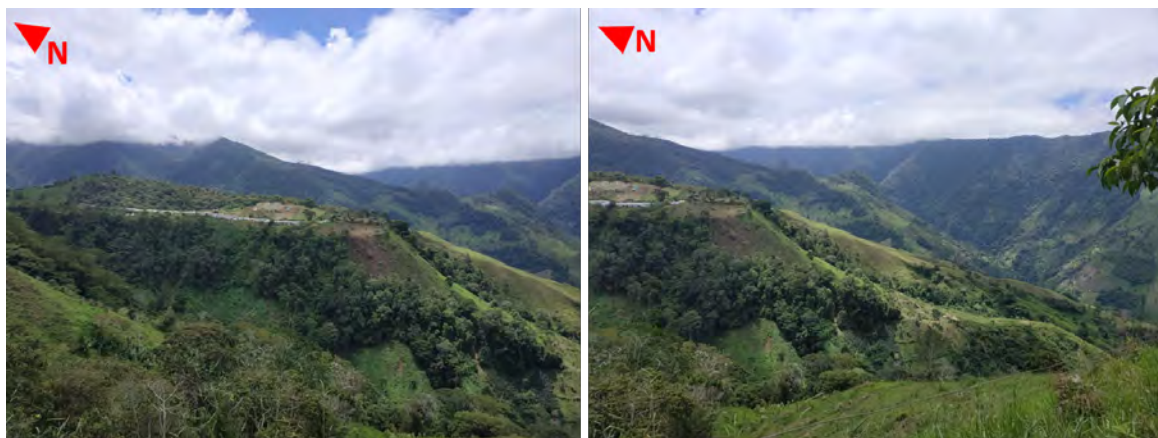


Figura 99: Vista de la parte final del depósito de vertiente sobre el cual se ubica el antiguo ETCR Llano Grande

soportado (80/20) en otras, presenta selección moderada a muy pobre seleccionada, el color de la matriz es ocre claro a medio. Su granulometría en algunas



Figura 100: Depósito de vertiente. a) Depósito de vertiente sobre el que está asentado el antiguo ETCR Llano Grande (color amarillo), y cañón formado por la quebrada Llanogrande (color blanco). b) Cañón de la quebrada Llanogrande. c) Vista del depósito de vertiente hacia el norte

zonas predominan los tamaños limo (70 %) y en otros la arena fina (40 %), su plasticidad es de media a baja y su consistencia es blanda, la humedad varía de húmeda a seca. La forma de los clastos es variada, encontrándose esféricos, discoidales y tabulares, subredondeados a subangulares, con diámetros de tamaños desde 1cm hasta de 1m, aunque también se observan bloques en el antiguo ETCR de hasta 4m de diámetro. Los clastos están conformados por limolita gris oscura y areniscas principalmente, con un grado de meteorización moderado a alto (Figura 101).

Se aclara que según la cartografía geológica 1:100.000 de INGEOMINAS (2010), este polígono corresponde a un depósito aluvial, el cual no abarcaba el área del antiguo ETCR por completo. A partir de la visita a campo se chequea, que este polígono representa un depósito de vertiente que envuelve al predio asignado para el antiguo ETCR.

Por otro lado sobre la vía que conduce desde Dabeiba hacia el antiguo ETCR de Llano Grande, se identifican varios depósitos de vertiente de menor extensión (Figura 102).

Los pesos asignados a estas unidades geológicas superficiales se muestran en la Tabla 38.



Figura 101: Perfil del material que conforma el depósito de vertiente



Figura 102: Algunos depósitos de vertiente vistos desde la vía que conduce de Dabeiba al antiguo ETCR Llano Grande.

Tabla 38: Unidades geológicas presentes en el área de influencia para la evaluación de amenaza en el antiguo ETCR Llano Grande con pesos asignados

Símbolo	Unidad	%Área	Peso WoE
K2cn	Miembro Nutibara	18,28	-0,38
JRK1du	Diabasas y basaltos	15,37	0,83
K2alu	Miembro Urrao	40,98	0,15
K2pmn	Complejo Cañasgordas	24,98	-1
Qal	Depósitos aluviales	0,04	-3,86
Qat	Depósitos aluviotorrenciales	0,11	-4,88
QV	Depósitos de vertiente	0,99	0,78

8.5.4.2. Evolución de las coberturas (Ec)

Para estimar las coberturas actuales del suelo se utilizó la imagen satelital correspondiente al primer semestre del año 2020 de la misión Sentinel-2. A esta imagen se le aplicó un filtro para reducir la cobertura de nubes. A partir de esta imagen procesada, se implementó una clasificación supervisada a través del algoritmo de clasificación *Random Forest* para cuatro categorías de coberturas: urbano, bosque, pastos y suelo desnudo. En la Figura 103 se puede observar la distribución de las coberturas. El norte de la cuenca está dominado por la cobertura boscosa con algunas pequeñas zonas de pastos o suelo desnudo de algunos movimientos en masa. Mientras que al sur de la cuenca dominan los pastos y suelos desnudos, muy posiblemente asociados a sistemas de agricultura aunque la resolución de esta imagen satelital no lo permite establecer. La cobertura urbana se concentra en el predio del antiguo ETCR.

Adicionalmente se utilizó el índice de vegetación normalizado (NDVI) propuesto por Rouse Jr (1974), el cual 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 Llano Grande, se utilizaron imágenes satelitales Landsat 5 para el periodo 1985-1990,

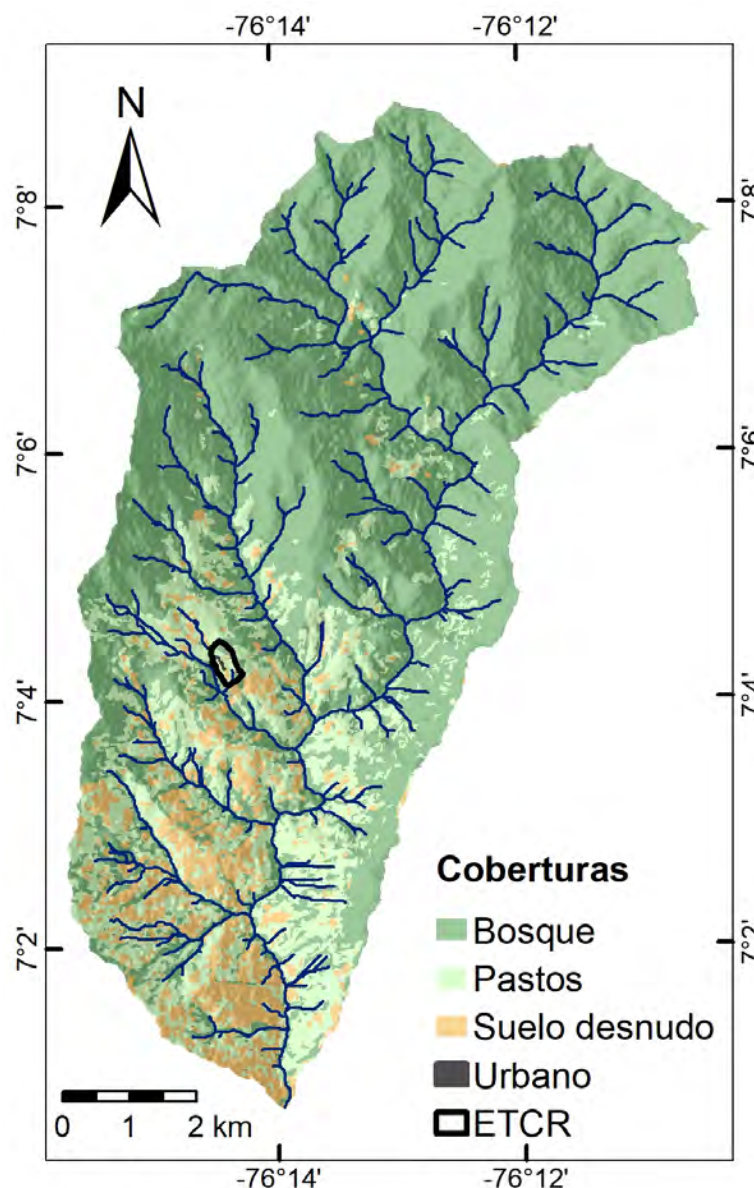


Figura 103: Coberturas actuales.

1991-1995, 1996-1999, 2000-2005, Landsat 8 para el año 2014 y Sentinel 2 para el año 2020. Algunas imágenes 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 104 se presenta el NDVI de la zona para el periodo más lejano y el año más reciente. Se puede observar que para el 2020 hubo un incremento en la vegetación vigorosa en la región centro-norte de la cuenca, sin embargo, en la zona centro aumento la intervención y por ende el NDVI presento valores menores, además se observa claramente la zona del antiguo ETCR y los bajos

valores de NDVI que presenta. Es de resaltar que las imágenes presentan un nivel de detalle diferente, debido a que la resolución espacial de los satélites utilizados fue diferente.

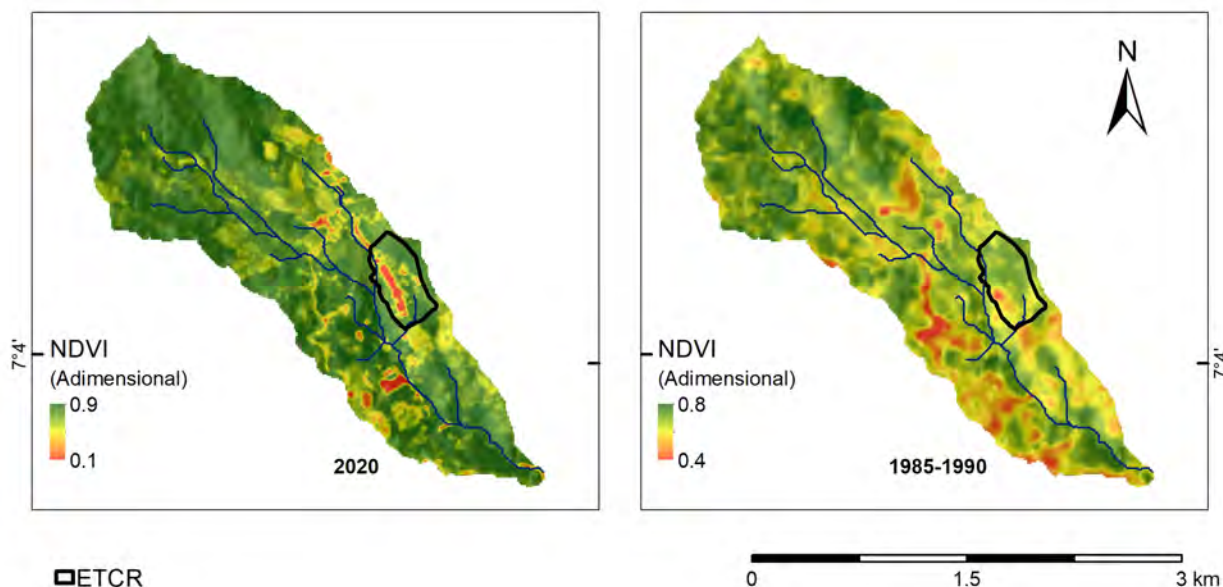


Figura 104: Índice vegetación normalizado Llano grande año 1991-2020

En la Figura 105 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 los últimos periodos, 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 gradual a partir del periodo 1991-1995 debido al aumento en la deforestación y/o construcción.

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 1986-1987, 1999-2000 y 2020. Este procedimiento se basa en trabajar tres periodos temporales de crecimiento vegetal y generar una composición RGB, la cual se fundamenta en la combinación de los tres índices NDVI de forma simultánea (Sader y Winne, 1992).

La correlación efectuada entre la banda del rojo, verde y azul con el respectivo valor temporal de NDVI permite representar las tasas de cambio vegetal a lo largo del tiempo a través de la combinación de colores, identificando así

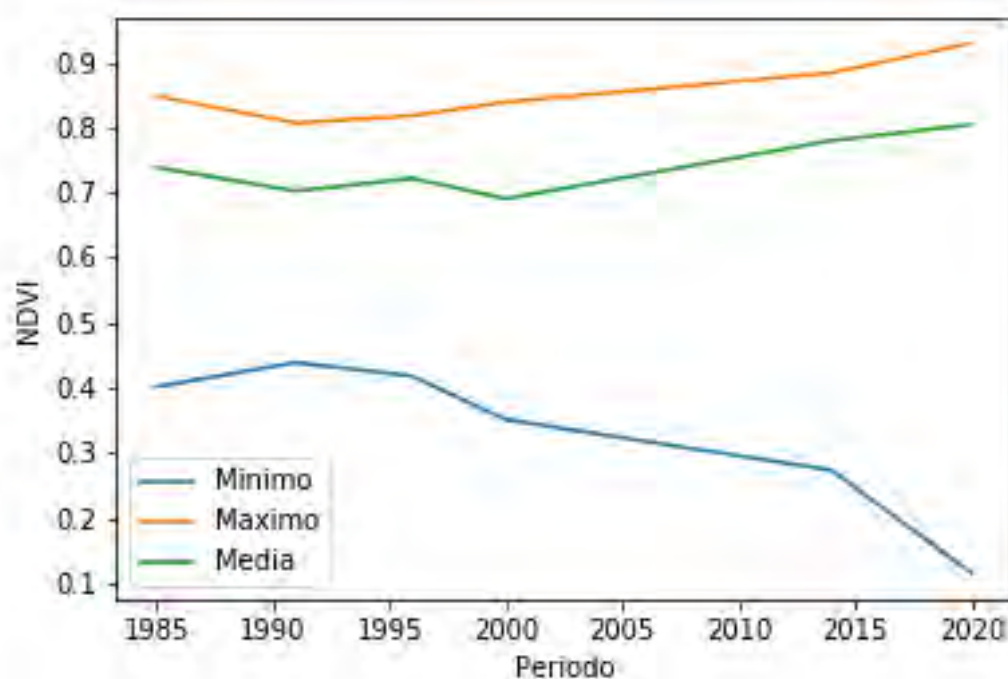


Figura 105: Representación estadística NDVI Llano Grande

presencia de vegetación, suelo desnudo o agua a lo largo del tiempo. La tonalidad de estos colores se encuentra en función de la ausencia o presencia de la vegetación para cada periodo y la fase de crecimiento vegetal (Sader y Winne, 1992). Alguno de los colores percibidos en el análisis multitemporal del NDVI se representan en la Figura 106, 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.

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 106: Tonalidades resultantes de combinación NDVI multitemporal

La Figura 107, muestra el mapa de combinación RGB multitemporal para los periodos 1986-1987, 1999-2000 y 2020 en el área de estudio Llano Grande. Se puede observar las variaciones que ha sufrido la vegetación en esta cuenca a lo largo del tiempo debido a los diferentes tonos de color que presenta espacialmente. Donde, el tono de color gris-blanco presente en el área de estudio indica presencia de vegetación vigorosa en los tres periodos analizados, el tono de color naranja indica vigorosidad para los periodos 1986-1987 y 1999-2000, el tono de color fucsia en la parte norte indica vigorosidad en la vegetación para los periodos 1986-1987 y 1999-2000, los tonos verdes indican mayor vigorosidad para el año 1999-2000, los tonos azules indican presencia de vegetación con mayor vigorosidad para el año 2020 y el tono de color negro en la parte centro-sur del área de estudio indica ausencia de vegetación en los tres periodos analizados.

Para la evolución de las coberturas se realizó un análisis desde el año 1987 hasta el año 2020 evaluando como han evolucionado las cuatro categorías de cobertura: bosques, pastos, suelos desnudos y construcciones urbanas. En el año 1987, a partir de imágenes satelitales se evidencia cobertura boscosa que alcanzaba cerca del 60 % de la cuenca, los pastos un 23 % y los suelos desnudos cubrían un 17 % del área. Los suelos urbanos, aunque presentes, no son representativos ni cubren un área extensa. Para el inicio de siglo, representado en el año 2001, el área clasificada como suelo desnudo disminuyó un 12 % al aumentar la cobertura boscosa y los pastos.

Para el año 2014 la cobertura boscosa sigue en aumento hasta alcanzar poco más del 71 % de la cuenca; aunque en este periodo aumenta el área de suelos desnudos en 4 % al disminuir los pastos en 7 %. Finalmente, en el último año analizado, el 2020, las coberturas se mantienen estables en proporción con una leve disminución de los suelos desnudos.

Espacialmente, los bosques dominan el norte y la vertiente occidental de la cuenca. Los pastos se encuentran principalmente en la zona sur-oriental y algunas franjas alargadas en el norte y representan la transición entre los bosques y los suelos desnudos. Estos últimos dominan el sur y sur-oriente de la cuenca y pequeñas zonas en zonas más altas asociados a procesos erosivos y movimientos en masa.

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 147 %. Igualmente, en este periodo los bosques aumentan 19 %, los pastos disminuyen 15 % y los suelos desnudos 49 %. Esto se puede observar en la Figura

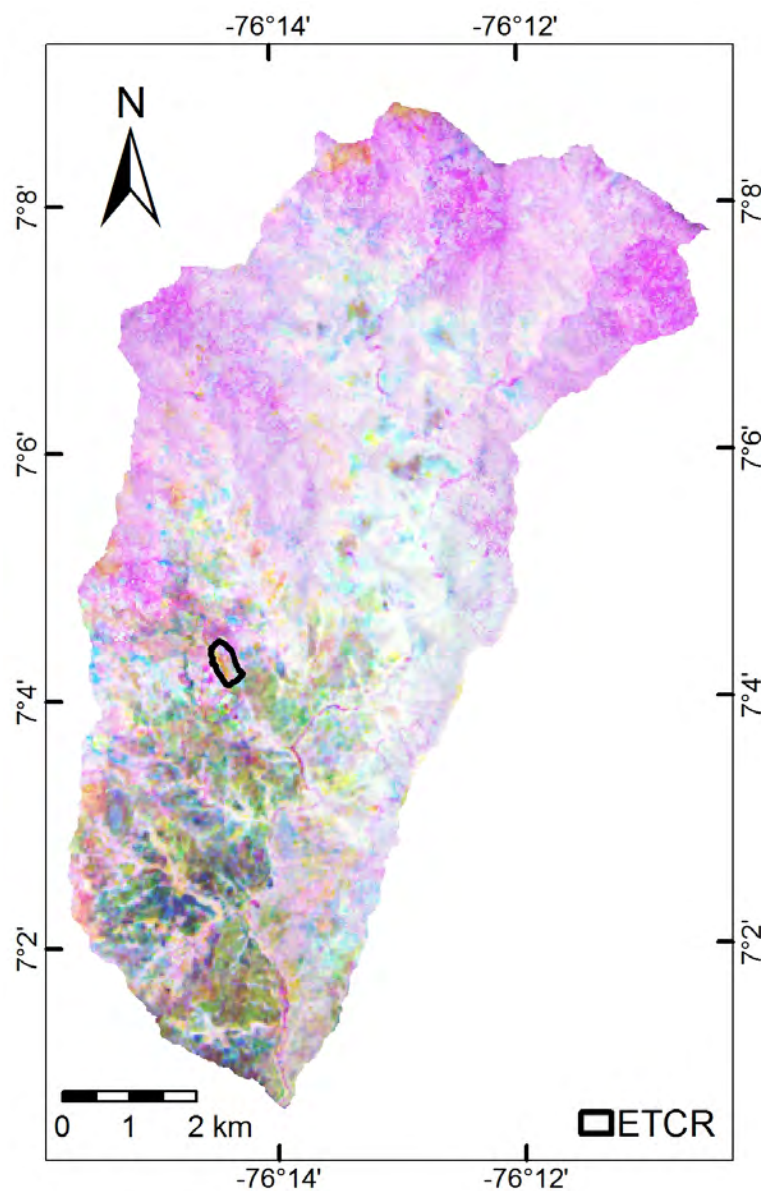


Figura 107: Representación multitemporal NDVI

108.

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

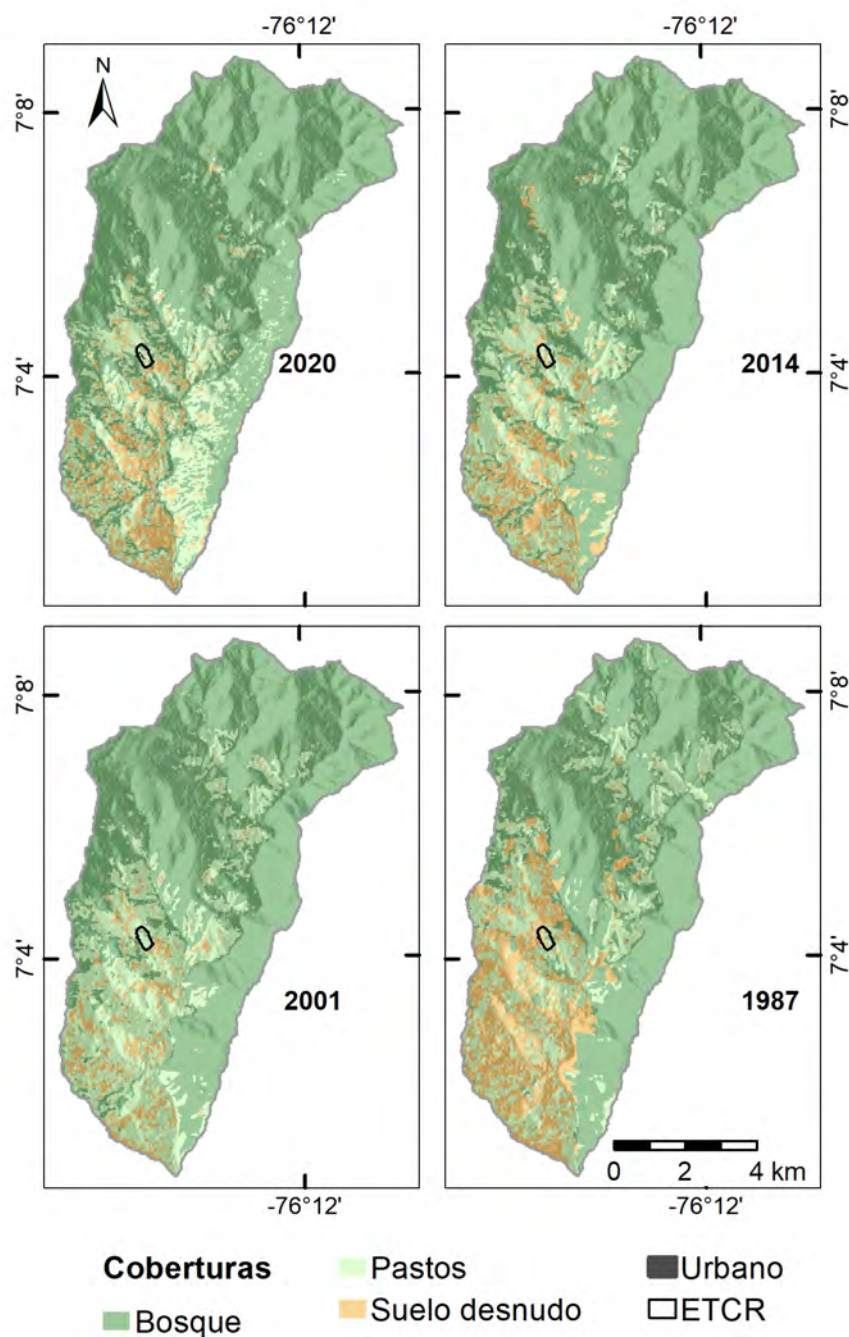


Figura 108: Evolución de las coberturas multitemporal.

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 109 se presenta esta variable. Como se puede observar, los mayores cambios se encuentran en la zona sur de la cuenca, donde la vertiente occidental presenta en su mayoría cambios positivos, mientras que en la vertiente oriental dominan los cambios negativos. Al norte de la cuenca se asocian los cambios principalmente a los valles de los drenajes tributarios posiblemente asociados a los bosques de galería.

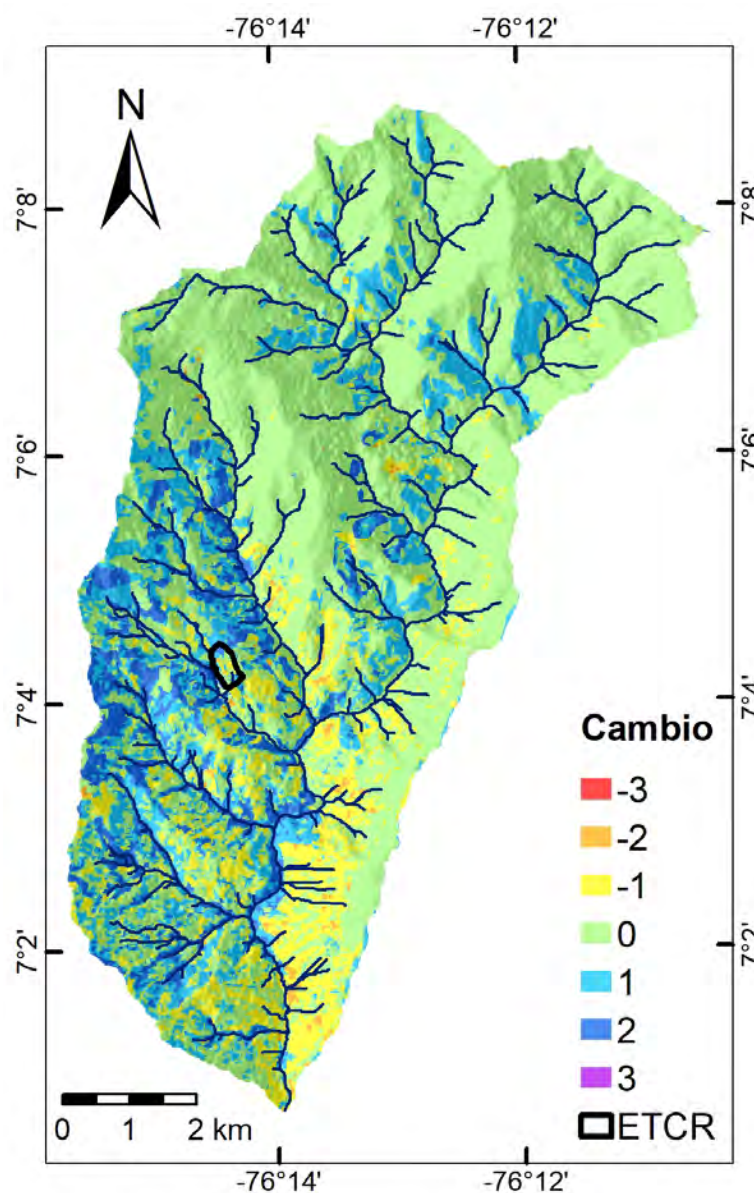


Figura 109: Evolución de las coberturas.

La Figura 110 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 1987 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 (ver Tabla 39).

Tabla 39: Evolucion de las coberturas

Cambio	%Área	Peso WoE
Pastos a Urbano	0,01	−1,94
Suelo desnudo a Urbano	0,01	−2,65
Bosque a Bosque	53,37	−0,82
Pasto a Bosque	10,80	0,06
Suelo desnudo a Bosque	7,23	−0,27
Bosque a Pastos	5,57	0,60
Pastos a Pastos	8,13	0,65
Suelo desnudo a Pastos	6,10	0,67
Bosque a Suelo desnudo	0,65	1,04
Pastos a Suelo desnudo	4,33	0,24
Suelo desnudo a Suelo desnudo	3,79	0,54

8.5.4.3. Curvatura (Cu)

Como se mencionó anteriormente la curvatura incluida en el análisis corresponde a una aproximación geomorfológica para identificar geoformas del relieve con incidencia en la susceptibilidad por movimientos en masa; en este caso la concentración y velocidad del flujo subsuperficial. En este caso se evalúa en dos dimensiones: plana y perfil; en la primera, el valor 0 indica que la superficie es

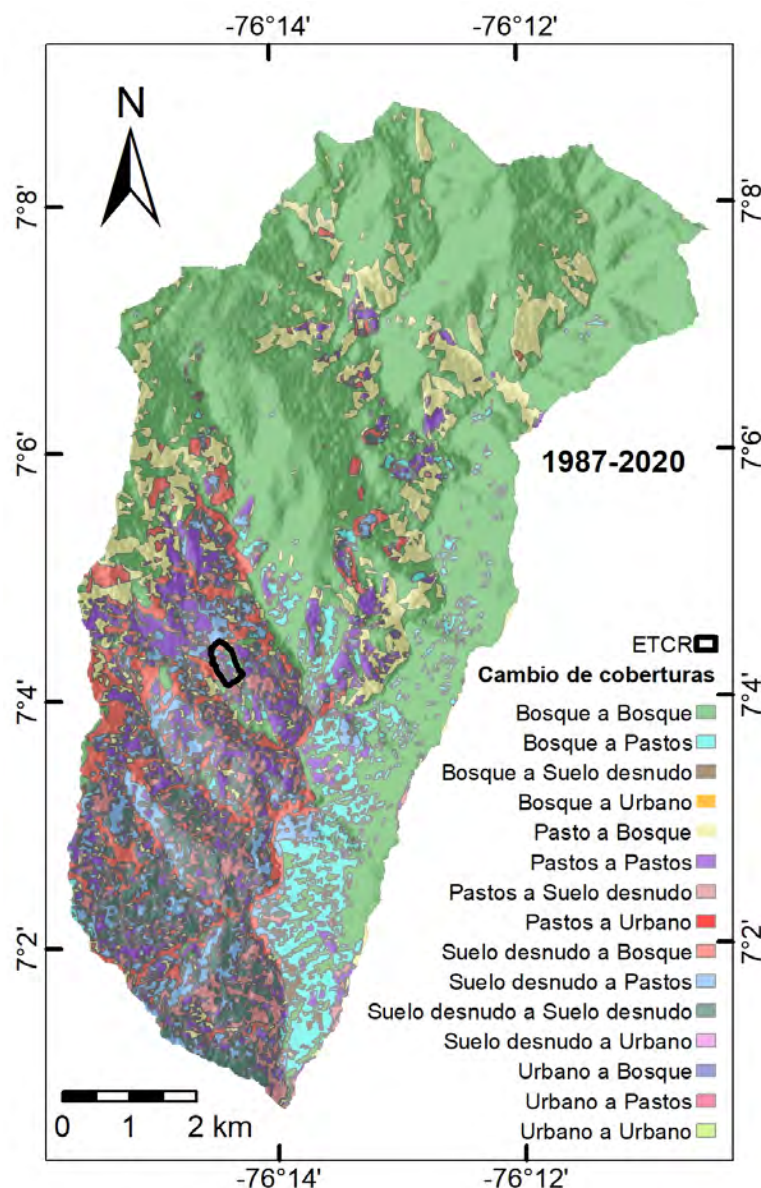


Figura 110: Cambio coberturas año 1987-2020

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 40 muestra los rangos tomados para cada clase según los dos diferentes mapas de curvatura. Esta variable señala la efectividad de la topografía para concentrar o dispersar la mayor cantidad de agua de lluvia en un punto determinado de la ladera. Dado que representa el relieve según la dirección de la máxima pendiente, esta variable afecta a la infiltración, la escorrentía y

la aceleración y desaceleración del flujo, por lo tanto influye en la erosión y depositación de material en la superficie del terreno (Londono, 2006).

Tabla 40: Rangos de las geoformas de curvatura

Rango	Categoría Mapa Perfil	Categoría Mapa Planar
$< -0,1$	Cóncavo	Convexo
$-0,1$ a $0,01$	Plano	Plano
$> 0,01$	Convexo	Cóncavo

El mapa de curvatura resultante (Figura 112) conformado por el mapa de curvatura de perfil y el mapa de curvatura plana se presenta en la Figura 111a y la Figura 111b respectivamente. Esta variable se divide en nueve categorías como lo señala la Tabla 41, que además, indica el porcentaje de área de la zona de estudio y los pesos asignados a cada clase para la evaluación de la susceptibilidad.

Tabla 41: Clases de geoformas de curvatura con sus respectivas áreas de ocupación en la zona de estudio y el peso asignado para la evaluación de la susceptibilidad.

	Clases	Símbolo	%Área	Peso WoE
Pisos inclinados	Plano plano	P-P	0,067	0,17
Valle inclinado	Cóncavo plano	C-P	0,01	0,39
Colinas inclinadas	Convexo plano	Cx-P	0,004	0,16
Cuenca abierta inclinada	Plano cóncavo	P-C	0,08	-0,08
Cuenca cerrada inclinada	Cóncavo cóncavo	C-C	36,29	0,05
Cuenca protuberante inclinada	Convexo cóncavo	Cx-C	18,88	-0,05
Colinas empotradas	Cóncavo convexo	C-Cx	13,83	0,06
Colinas infladas inclinadas	Convexo convexo	Cx-Cx	30,79	-0,07
Crestas abiertas inclinadas	Plano convexo	P-Cx	0,004	-0,27

Las clases de geoformas que más se observan en el mapa de curvatura (Figura 112) según las estadísticas que muestra la Figura 113 son las C-C, Cx-Cx, Cx-C y C-Cx con un porcentaje respecto al área total de 36,3 % 30,8 % 18,9 % y 13,8 % respectivamente, y a su vez estas geoformas corresponden a características de cuencas cerradas inclinadas, colinas infladas inclinadas, cuenca protuberante inclinada y colinas empotradas, respectivamente. Se observa además, que no hay zonas específicas de concentración, por el contrario toda la zona, muestra una distribución muy semejante de las clases.

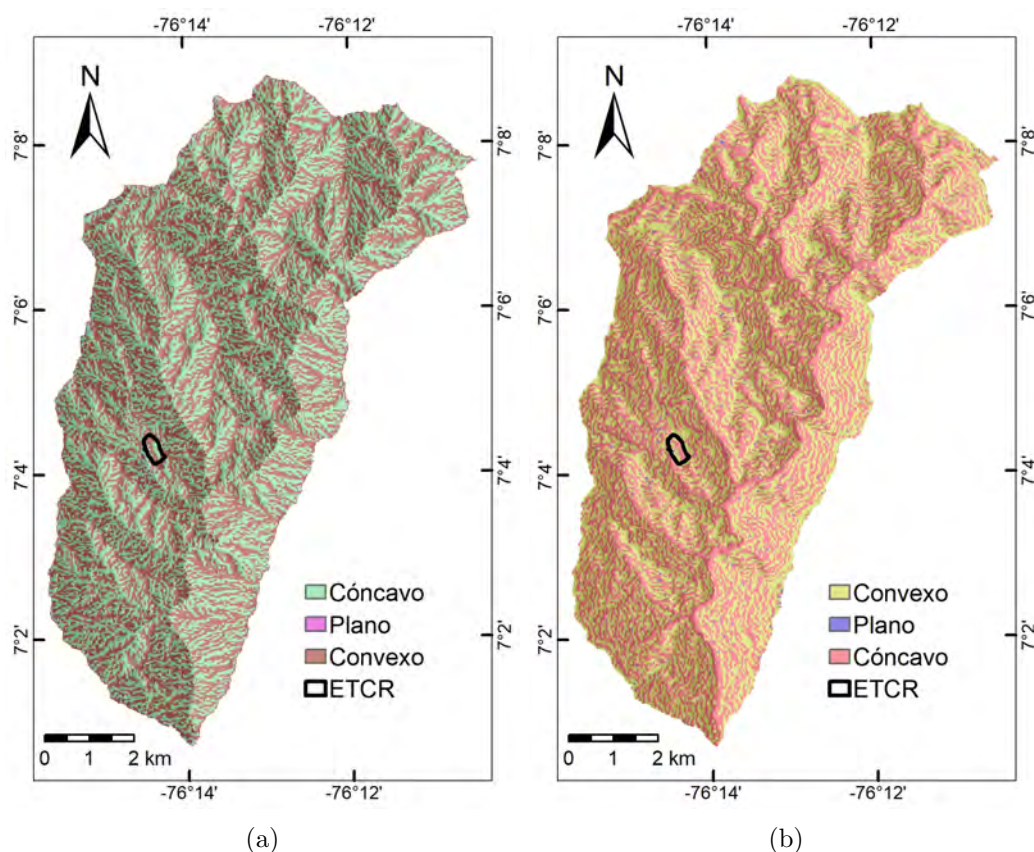


Figura 111: (a) Mapa de Curvatura Perfil y (b) Mapa de Curvatura Plana, antiguo ETCR La Llan Grande

8.5.4.4. Relieve relativo (RR)

Con base en los resultados generados y a partir del análisis del mapa de RR (Figura 114) se distingue un predominio del rango de alturas relativas de 500 a 600 m con un porcentaje de 28,1 % con respecto al área total y para los demás se encuentran rangos de menos de 400 m, de 400 a 450 m, de 450 a 500 m de 600 a 700 m con porcentajes de 17,4 %,17,3 %,16,8 %,13,3 % respectivamente (ver Tabla 42). Las concentraciones de estos rangos se encuentran distribuidos a lo largo de la zona de estudio.

Los rangos de alturas que son mayores a 700 m, representan solo el 7,1 % del área total y se concentran principalmente en la zona oriental de la zona de estudio y con pequeñas concentraciones en la zona norte.

8.5.4.5. Pendiente (S)

En la zona de estudio predominan los rangos de pendiente de 15 a 25°, de 25 a 30°, de 30 a 35° y de 35 a 40° con porcentajes respecto al área total de

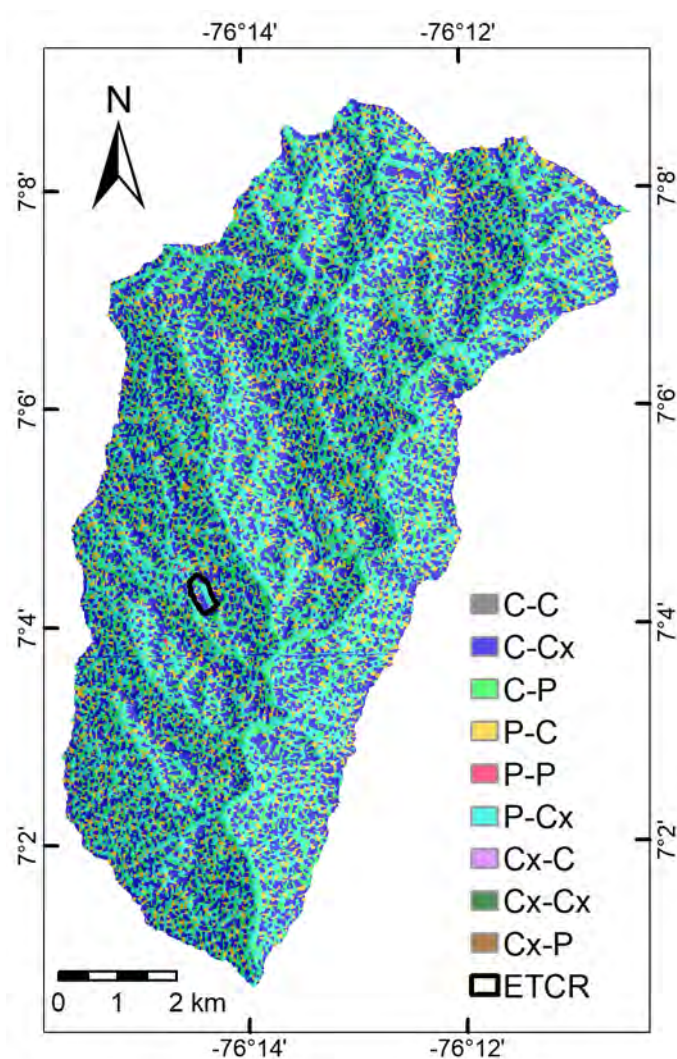


Figura 112: Mapa de Curvatura antiguo Llano Grande

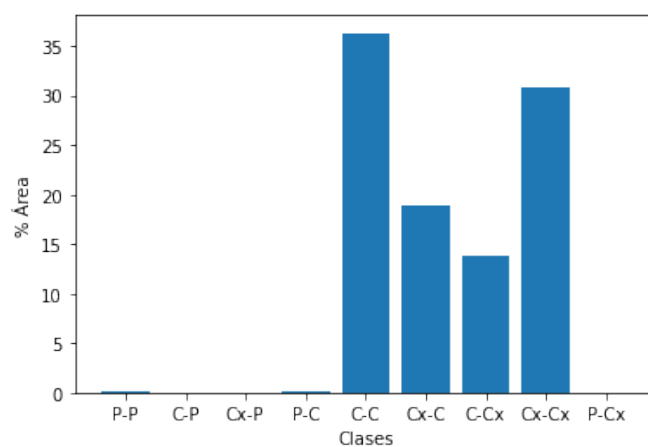


Figura 113: Gráfica de clases de *landforms* por su porcentaje en área del ETCR Llano Grande

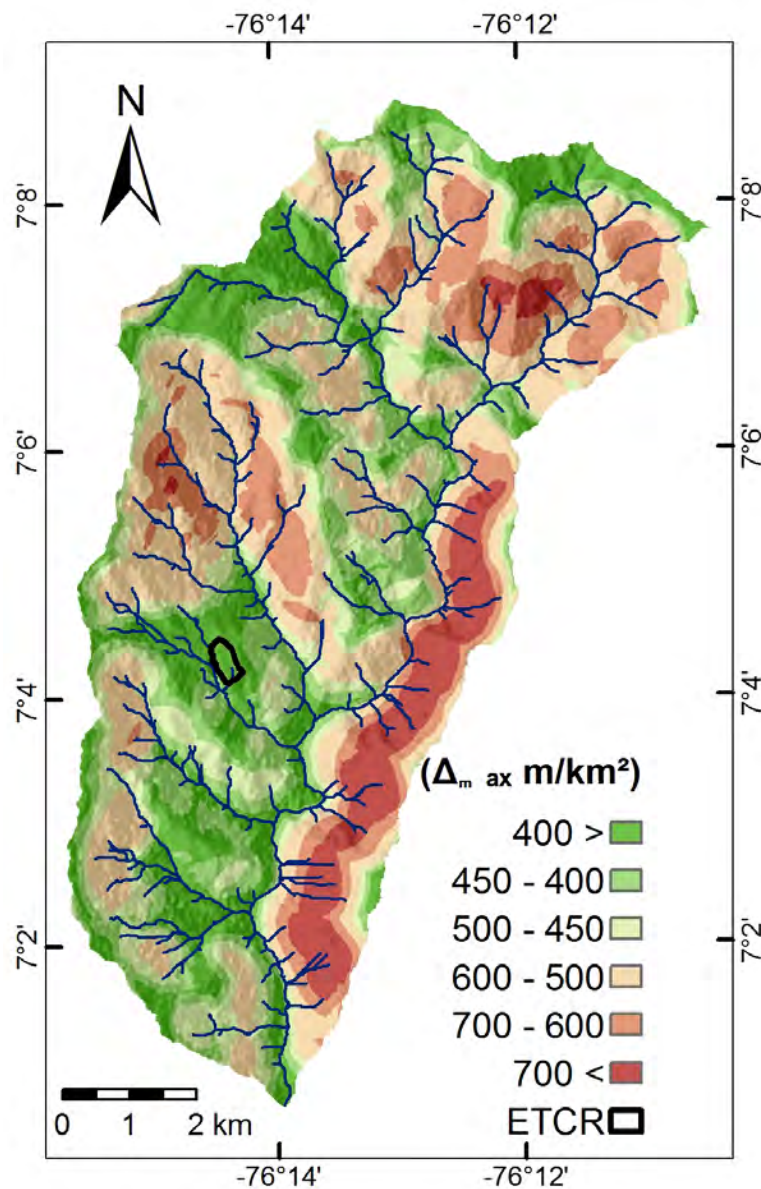


Figura 114: Mapa de índice de relieve relativo para el antiguo ETCR Llano Grande

23,3 %,17,7 %,17,9 %,15,0 %, respectivamente. El rango de 15 a 25° con un porcentaje de 23,3 % se posiciona como el más alto en términos de su porcentaje de área (ver Tabla 43). Las concentraciones de estos rangos se encuentran distribuidos a lo largo de toda la zona de estudio (Figura 115).

Los rangos de pendientes menores a 15°, de 40 a 45°, y mayores a 45°, representan solo un 26,2 % del área total (ver Tabla 43). Se presentan distribuidos en toda la zona de estudio, con concentraciones mayores en la parte oriental ver Figura 115. Los valores mayores a 45° solo representan un 6,8 % del área total y se distingue por ser el menor porcentaje de área.

Tabla 42: Categorías de la variable Relieve Relativo.

	Rangos (m)	Porcentaje del área total (%)	Peso WoE
Relieve bajo	< 400	17,37	-0,19
	400 a 450	17,27	0,60
Relieve medio	450 a 500	16,80	0,16
	500 a 600	28,15	-0,42
Relieve alto	600 a 700	13,34	-0,11
	> 700	7,06	-0,19

Tabla 43: Categorías de la variable Pendiente.

	Rangos	Porcentaje del área total (%)	Peso WoE
Muy inclinada	< 15	9,68	-0,85
Abrupta	15 - 25	23,32	-0,25
	25 - 30	17,68	-0,11
	30 - 35	17,87	0,20
	35 - 40	14,96	0,27
	40 - 45	9,65	0,36
Muy escarpada	> 45	6,85	0,10

8.5.4.6. Distancia al drenaje según la pendiente (DDS)

De forma general, los rangos se encuentran distribuidos a lo largo de la zona de estudio, no obstante, para los valores menores a 270 m se observa una mayor concentración en las zonas que demarcan las redes de drenaje (Figura 116).

Los rangos de las distancias al cauce se observan en la Tabla 44, de allí se destaca el rango que presenta una distancia al cauce de 50 a 170 m con porcentaje de área de 24,7 %, le siguen distancias de 270 a 400 m, 170 a 270 m y de 400 a 570 m, con porcentajes de áreas correspondientes a 20,3 %, 19,5 % y 18,5 %, respectivamente. Estos valores se observan en el mapa bordeando los cauces presentes en la zona (Figura 116). Se observa, además, que el área de los valores más altos y más bajos de distancia al cauce de la zona de estudio, es decir, los valores mayores a 600 m y los menores a 50 m, son los más bajos con respecto a los otros.

8.5.4.7. Distancia a las fallas (DF)

La distancia a fallas que más predominan en la zona con respecto a su porcentaje de área total comprende los rangos de 100 a 800 m y de 800 m en adelante (ver Tabla 45). Siendo el rango de 500 a 800 el de mayor porcentaje

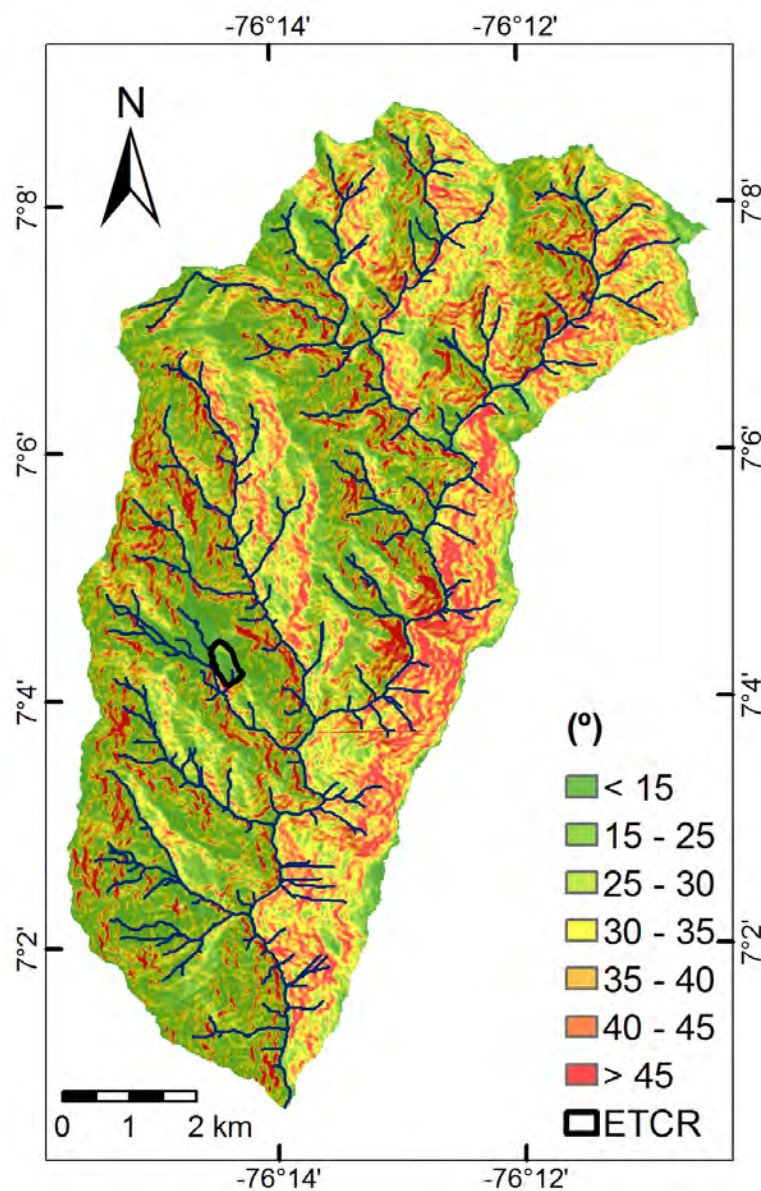


Figura 115: Mapa de índice de pendiente para el antiguo ETCR Llano Grande

Tabla 44: Índice distancia al drenaje según la pendiente.

Rangos (m)	Porcentaje del área total (%)	Peso WoE
< 50	9,71	-1,42
50 a 170	24,67	-0,18
170 a 270	19,47	0,36
270 a 400	20,31	0,04
400 a 570	18,45	0,30
> 600	7,39	-0,22

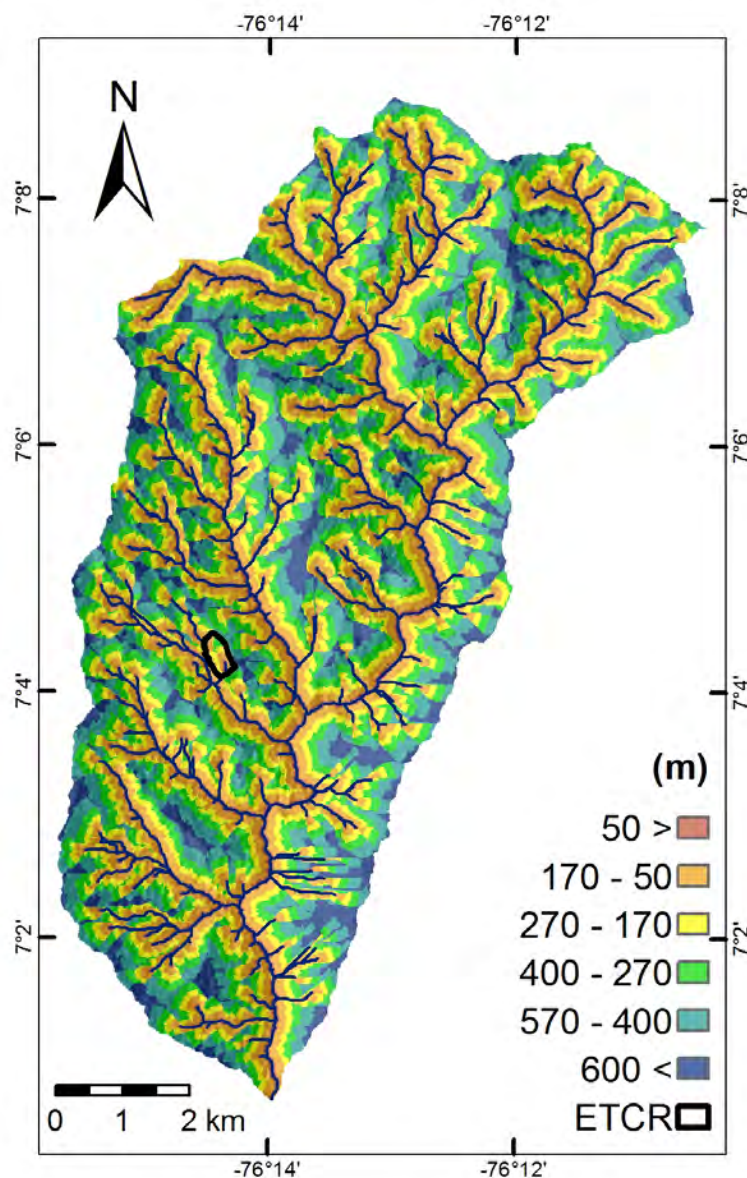


Figura 116: Mapa de índice de distancia al drenaje para el antiguo ETCR Llano Grande

con un 17,8 %. Estos valores se encuentran distribuidos por todo el área de estudio mostrando una demarcación visible de las trazas de las fallas que están presentes en el lugar, los rangos que mejor representan los sistemas de fallas se encuentran entre menor a 50 m, de 50 a 100 m, de 100 a 200 m con porcentajes con respecto al área total de 9,5 %, 8,8 %, 15,9 % representando un total de 34,2 %. El rango con menor porcentaje pertenece al de 50 a 100 m, con un porcentaje con respecto al área total de 8,8 % (ver Tabla 45). Estos rangos con los porcentajes más bajos representan bien los sistemas de fallas, sus orientaciones y su distribución general que se presenta por todo el área de estudio (Figura

117).

Tabla 45: Tabla Índice de distancia a las fallas para el antiguo ETCR Llano Grande

Rangos	Área %	Peso WoE
< 50	9,46	0,31
50 a 100	8,79	0,26
100 a 200	15,94	0,16
200 a 300	13,96	0,10
300 a 400	12,23	-0,09
400 a 500	10,10	-0,09
500 a 800	17,77	-0,34
> 800	11,74	-0,29

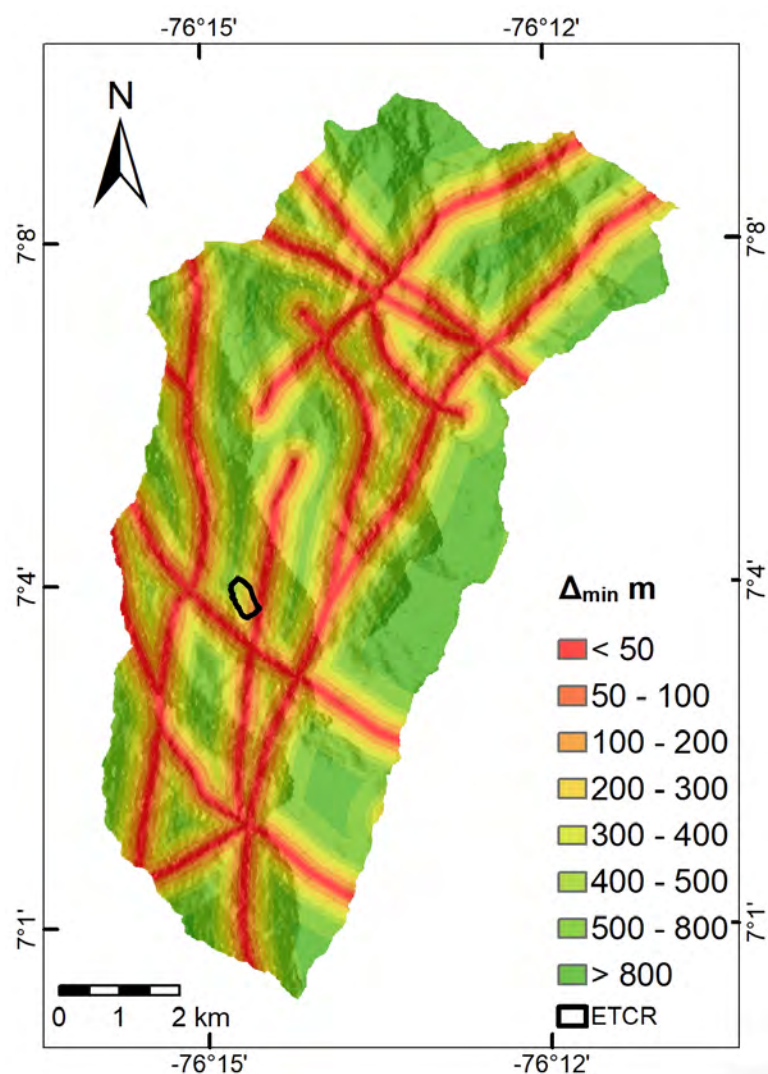


Figura 117: Mapa índice de distancia a las fallas del antiguo ETCR Llano Grande

8.5.4.8. Cinemático (Cin)

Los ambientes geológicos y estructurales que enmarcan las laderas han sido considerados como factores relevantes en la ocurrencia de movimientos en masa (Varnes, 1978). Estas características morfo-estructurales parten de la relación entre las discontinuidades estructurales o las estructuras inherentes de la roca, como foliación o estratificación, y la topografía en que es definido el vínculo entre 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 46.

Tabla 46: Clasificación cinemática de laderas. A: aspecto (0° - 360°), S: pendiente (0° - 90°), α : dirección del buzamiento (0° - 360°) y θ : buzamiento (0° - 90°). Modificado de Meentemeyer y Moody (2000).

Categoría	Condición	Subcategoría	Condición	WoE
Ortoclinal	$ A - \alpha = 90^{\circ} \pm 45^{\circ}$ o $270^{\circ} \pm 45^{\circ}$			-0,22
Cataclinal	$315^{\circ} < A - \alpha < 45^{\circ}$	overdip	$S > \theta$	-1,46
		dip	$S = \theta$	1,13
		underdip	$S < \theta$	-0,12
Anaclinal	$135^{\circ} < A - \alpha < 225^{\circ}$	empinado	$S > \theta$	0,93
		normal	$S = \theta$	0,77
		suave	$S < \theta$	0,01
No estructural	Depósitos			1,34

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 118. En esta variable se aprecia un dominio a lo largo de la cuenca de las laderas ortoclinales con franjas alargadas a los extremos este y oeste de la cuenca dominadas por laderas anaclinales suaves. Al norte, se encuentran extensas áreas de laderas cataclinales underdip.

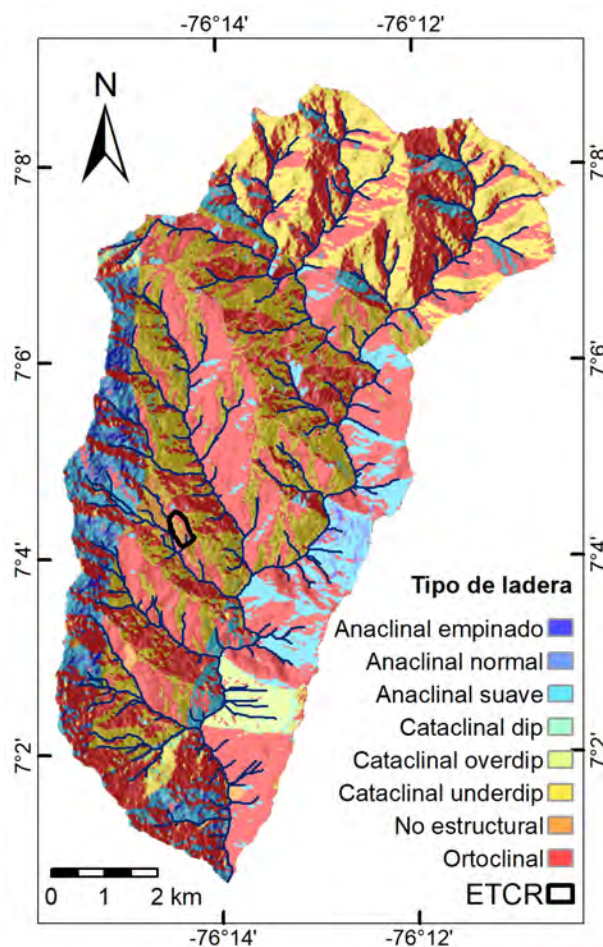


Figura 118: Clasificación cinemática de laderas.

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

La Ecuación 8.6 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:

$$IS = 28,5S + 6,9Cin + 4,8Cu + 11,7RR + 11,6DF + 2,9DDS + 13,7Ec + 19,9Gs \quad (8.6)$$

La Figura 119 presenta el mapa de susceptibilidad como variable continua por movimientos en masa para el área de influencia del antiguo ETCR Llano Grande. Las zonas de mayor susceptibilidad se encuentran en la margen derecha, parte baja y media de la cuenca, donde se presenta la mayor concentración de movimientos en masa registrados. es de anotar que dicha área no presenta las mayores pendientes, sin embargo corresponde a las zonas de mayor influencia antrópica con coberturas tipo pastos y construcciones. La parte alta de la cuenca y margen izquierda presentan las mayores pendientes, pero cubiertas con bosques, lo que ha conservado la estabilidad de sus laderas o ha encubierto la presencia de movimientos en masa.

8.5.6. Modelo Regresión Logística

El método estadístico multivariado denominado Regresión Logística (RL) estima la relación entre una variable dependiente (la ocurrencia de movimientos en masa) de valores dicotómicos de 0 (no ocurrencia) y 1 (sí ocurrencia), con un grupo de variables independientes, en este caso las variables condicionantes del terreno. La 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, 1998).

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

$$P(y) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (8.7)$$

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:

$$z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_nx_n \quad (8.8)$$

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

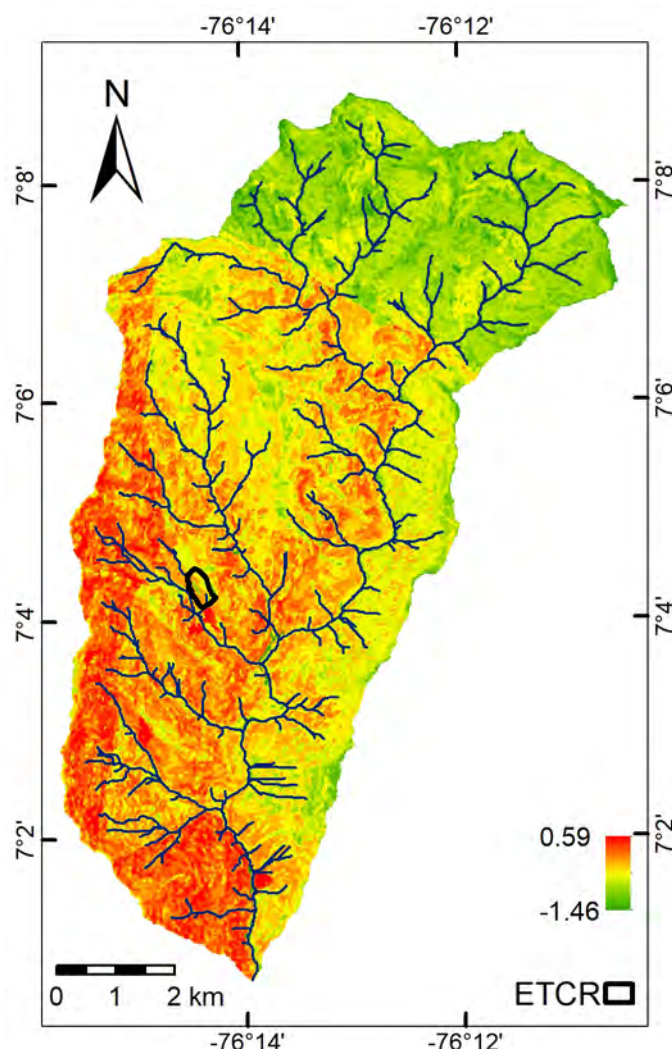


Figura 119: Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa utilizando AHP y WoE.

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 120 presenta el mapa de susceptibilidad continua por movimientos en masa para el área de influencia del antiguo ETCR Llano Grande 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

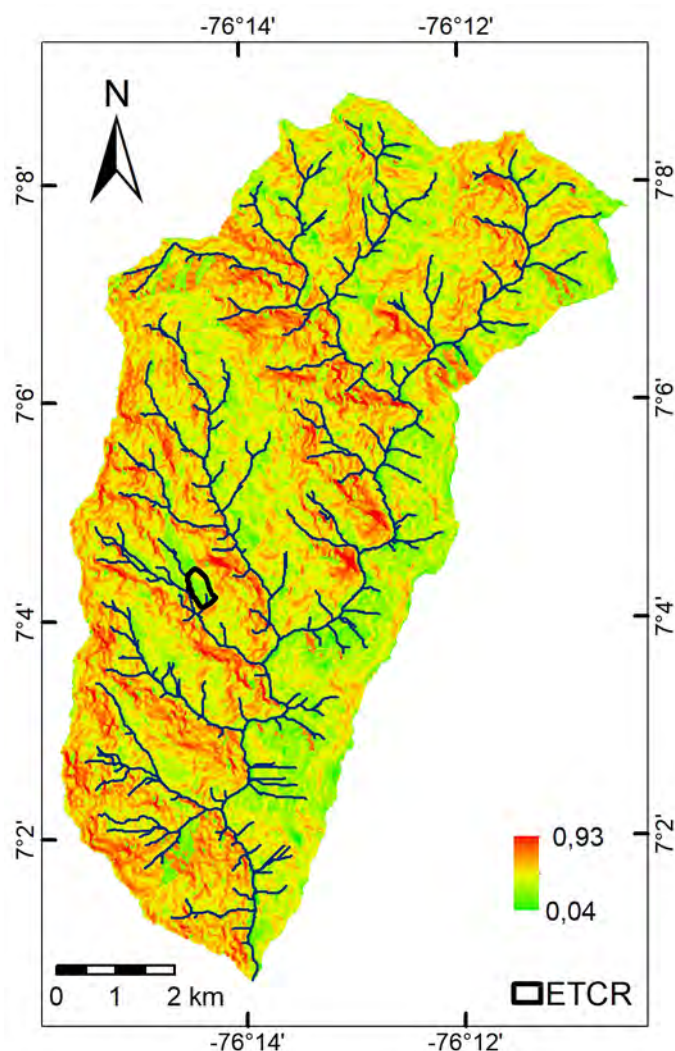


Figura 120: Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa utilizando RL

métodos. Para el presente estudio se presenta el Ara 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 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 121 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 122 se observan los valores de predicción y éxito para el método RL

De acuerdo con los resultados obtenidos y soportados en las curvas de desempeño y predicción, el mapa final seleccionado corresponde al modelo combinado de peso de la evidencia y AHP, y se representa en la Figura 123. El pobre desempeño de los métodos estadísticos multivariados para este caso, mas ro-

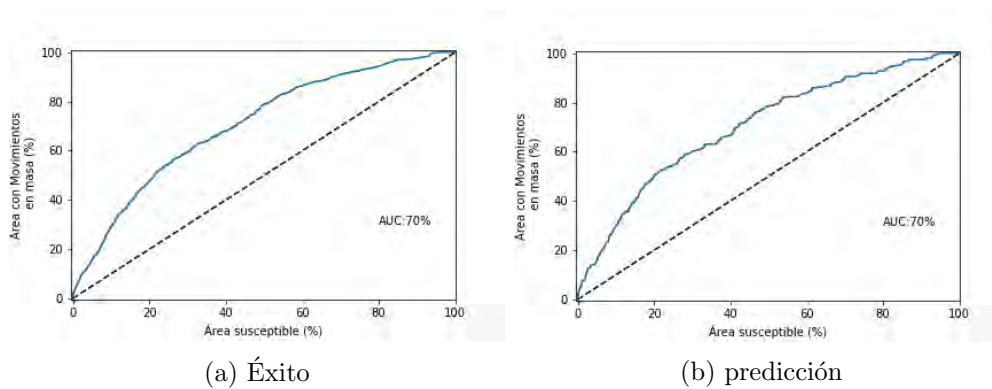


Figura 121: Area bajo la curva para el método AHP y peso de la evidencia

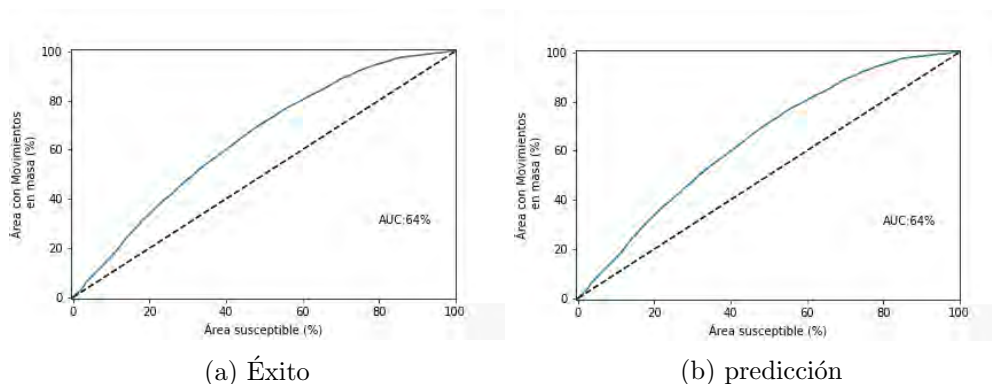


Figura 122: Area bajo la curva para el método regresión logística

bustos que los métodos bivariados, probablemente esté asociado con el relativo poco número de movimientos en masa del inventario utilizado. Estos métodos generalmente presentan buen desempeño cuando se cuenta con un completo y abundante inventario.

Considerando la morfodinámica activa de esta zona, la zonas topografía montañosa y condiciones de lluvia, es factible una ocurrencia mayor de movimientos en masa, a la reflejada por el inventario. Lo cual puede estar asociado a la ocurrencia de eventos de pequeña área y volumen, los cuales la morfodinámica propia de la zona reduce o elimina en su totalidad las evidencias que permitan su identificación en imágenes aéreas o satelitales y en recorridos de campo. La existencia de grandes áreas cubiertas de bosques y poco exploradas también reduce la capacidad de levantar dichos eventos.

Finalmente se realiza un proceso de depuración y ajuste teniendo en cuenta el área mínima cartografiable y el Decreto 1807 del 2014, el cual corresponde a las zonas con valores de pendiente inferior a 5° y sin evidencias de susceptibilidad se consideran categoría baja. En la Tabla 47 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 m^2 , área que representa a 16 celdas ($12,5 \times 12,5$), lo cual corresponde a la unidad mínima cartografiable.

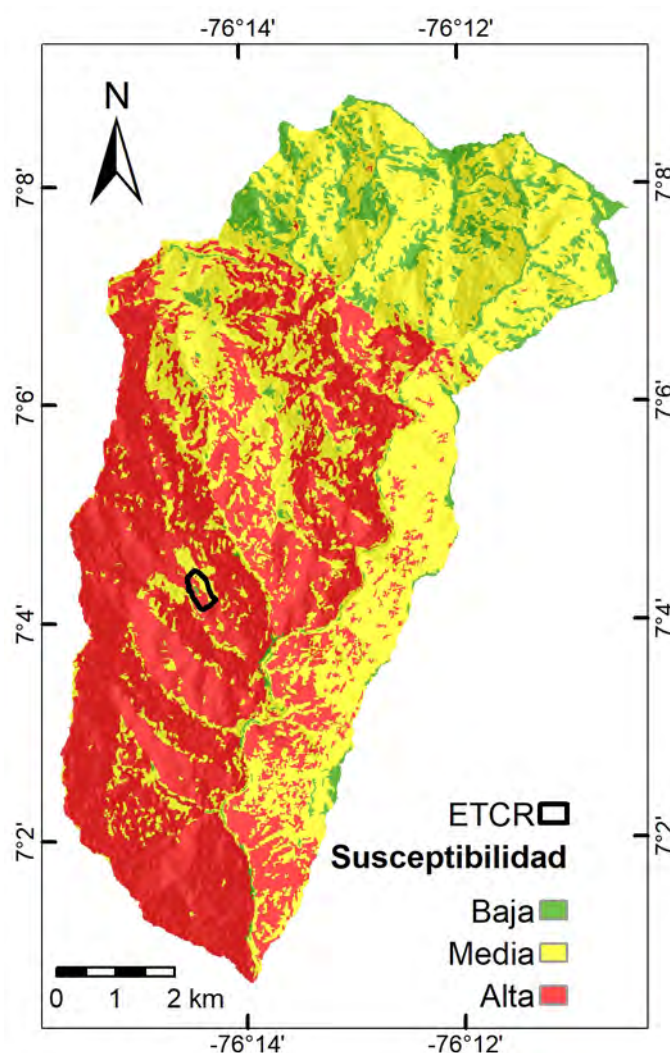


Figura 123: Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa en el antiguo ETCR Llano Grande.

Considerando esta dependencia de los métodos estadísticos a los inventarios de movimientos en masa, y la necesidad de incluir la lluvia como factor detonante y principal de la ocurrencia de movimientos en masa en nuestro territorio, se implementa el modelos con base física denominado SHALSTAB, el cual acopla un modelo hidrológico y geotécnico para evaluar la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia. La descripción detallada y resultados se presentan en 10.

Tabla 47: Susceptibilidad por movimientos en masa del antiguo ETCR Llano Grande.

Categoría	Área %	Probabilidad
Baja	8,06	$6,31E - 4$
Media	43,79	$1,56E - 3$
Alta	48,15	$5,04E - 3$

8.6. Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia

8.6.1. SHALSTAB

SHALSTAB utiliza el modelo hidrológico TOPOG (O'loughlin, 1986), el cual utiliza la precipitación en estado estacionario para construir el patrón espacial de humedad basado en el área aferente a cada punto, la pendiente y la transmisividad del suelo. La humedad del suelo es calculada como:

$$W = \frac{Qa}{bT \sin \theta} \quad (8.9)$$

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 θ es la pendiente. Asumiendo que la transmisividad no varía con la profundidad, se puede entonces asumir:

$$W = \frac{h}{z_t} \quad (8.10)$$

Donde h es el espesor del suelo saturado y z_t el espesor total de suelo. Combinando las ecuaciones 8.9 y 8.10 se puede estimar la saturación relativa del perfil de suelo como:

$$\frac{h}{z_t} = \frac{Qa}{bT \sin \theta} \quad (8.11)$$

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.

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

Donde ρ_s es la densidad del suelo, ρ_w es la densidad del agua, g es la aceleración de la gravedad, c' es la cohesión efectiva del suelo, y ϕ es el ángulo de

fricción. Reescribiendo la anterior ecuación en términos de la relación h/z :

$$\frac{h}{z_t} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) + \frac{c'}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} \quad (8.13)$$

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

$$\frac{a}{b} = \frac{T}{Q} \sin \theta \left[\frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) + \frac{c'}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} \right] \quad (8.14)$$

A partir de la ecuación 8.14 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:

$$\tan \theta < \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \tan \phi + \frac{c'}{\rho_s g z \cos^2 \theta} \quad (8.15)$$

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

$$\tan \theta \geq \tan \phi + \frac{c'}{\rho_s g z \cos^2 \theta} \quad (8.16)$$

El modelo de SHALSTAB es implementado en la plataforma *Google Colab* mediante un algoritmo en lenguaje python (.ipynb), el modelo empleado está 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 de elevación digital con 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 empleó la ecuación 8.17 que se basa en la relación inversa de la pendiente con el espesor del suelo.

$$h_i = h_{max} \left[1 - \frac{\tan \theta_i \cdot \tan \theta_{min}}{\tan \theta_{max} \cdot \tan \theta_{min}} \cdot \left(1 - \frac{h_{min}}{h_{max}} \right) \right] \quad (8.17)$$

Donde θ_{max} y θ_{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 ϕ , peso unitario γ_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 (2010) y los rangos de valores de parámetros geotécnicos recopilados en <http://www.geotechdata.info/parameter/>. En la Tabla 48 se presenta la parametrización geotécnica de cada unidad geotécnica homogénea en donde las propiedades de resistencia e hidráulicas se consideran constantes ajustada al tipo de suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS) correspondiente a las unidades geológicas superficiales (Figura 4) .

Tabla 48: Parámetros geotécnicos para las unidades geológicas superficiales.

Unidad	Tipo de suelo	c' (kPa)	ϕ°	$\gamma_s(kN/m^3)$	$k_s(m/s)$
JRK1du	CL	16	27	18	$5,0x10^{-8}$
K2alu	SM	15	30	18	$5,4x10^{-6}$
K2cn	SM	15	30	18	$5,4x10^{-6}$
K2pmn	SC	15	30	19	$5,0x10^{-7}$
Qal	SW	0	38	20	$8,4x10^{-5}$
Qat	SW	0	35	21,5	$5,0x10^{-4}$
Qv	SW-SM	5	38	21	$8,4x10^{-5}$

Los resultados de la amenaza para movimientos en masa son establecidos a partir de las condiciones de estabilidad descritas en la formulación del modelo; las categorías estables e inestable consideran la estabilidad de la celda sujeto al escenario de lluvia definido, mientras que las celdas incondicionalmente estables e inestables se establecen para condiciones saturadas y secas, respectivamente. En la Tabla 49 se presentan los eventos de lluvia a partir de las intensidades correspondientes a periodos de retorno de 10, 100 y 500 años. Se aclara que las

intensidades de lluvia fueron estimadas para una duración igual al tiempo de concentración la quebrada Llanogrande.

Tabla 49: Escenarios de lluvia establecidos para periodos de retorno (Tr) de 10, 100 y 500 años.

Tr	Intensidad (mm/h)
10	66, 40
100	92, 21
500	111, 77

En las Figuras 124, 125 y 126 se presentan la amenaza por movimientos en masa superficiales según las condiciones de estabilidad para cada escenario de lluvia.

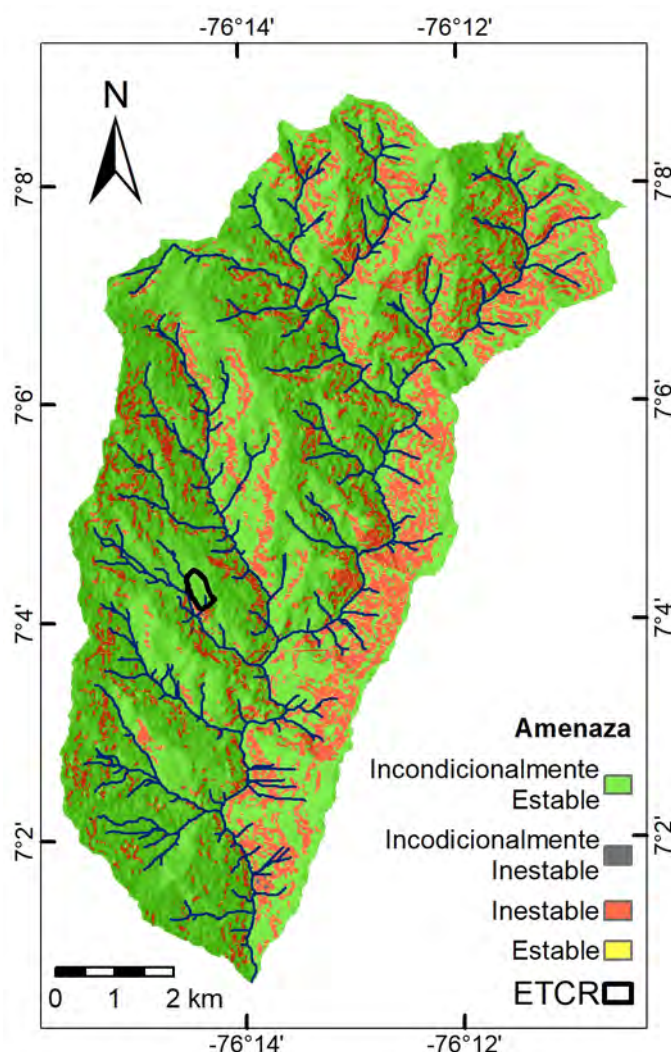


Figura 124: Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 10 años.

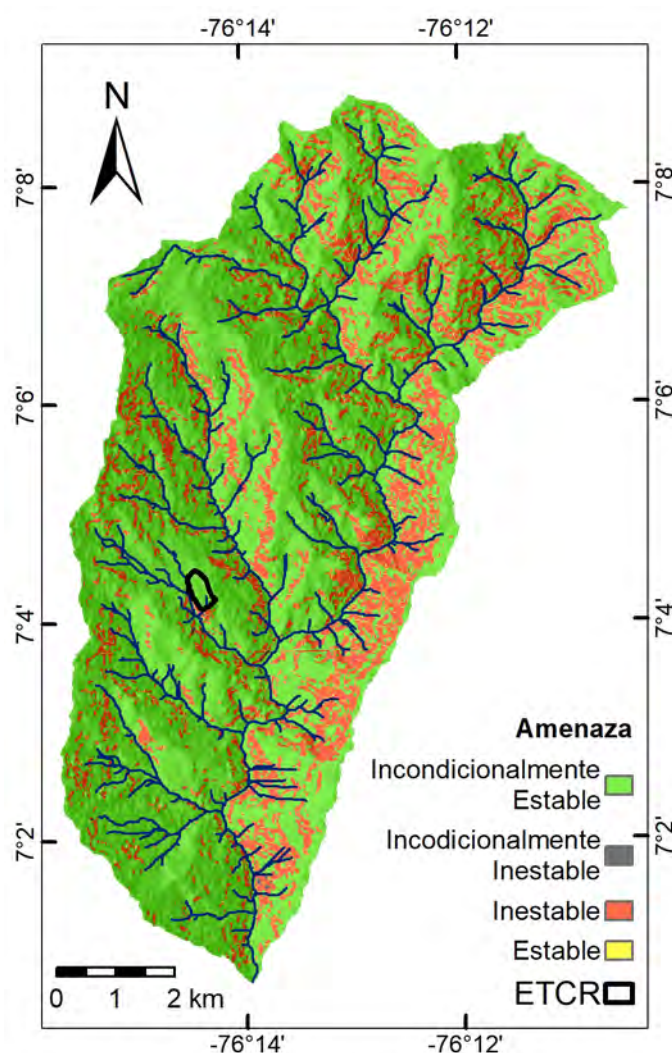


Figura 125: Susceptibilidad por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 100 años.

A partir de los resultados para las distintas intensidades de lluvia se observa que las zonas inestables e incondicionalmente inestables se concentran en el costado norte y este de la cuenca, estas celdas 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 49.

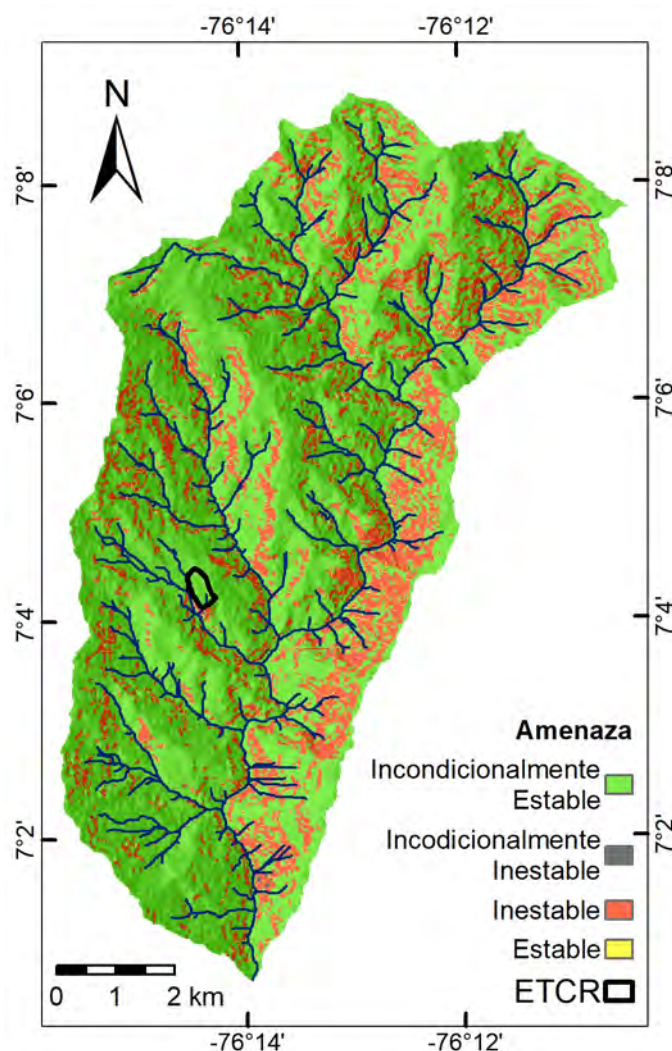


Figura 126: Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 500 años.

8.7. Amenaza por movimientos en masa detonados por sismo

8.7.1. Sismicidad histórica

El municipio de Dabeiba registra un histórico sísmico de 1510 eventos entre jun/1993 y jul/2020 (Figuras 127 y 128) según el registro de sismicidad histórica de Colombia, además se presentan los sismos que mayores daños causaron (<http://sish.sgc.gov.co/>).

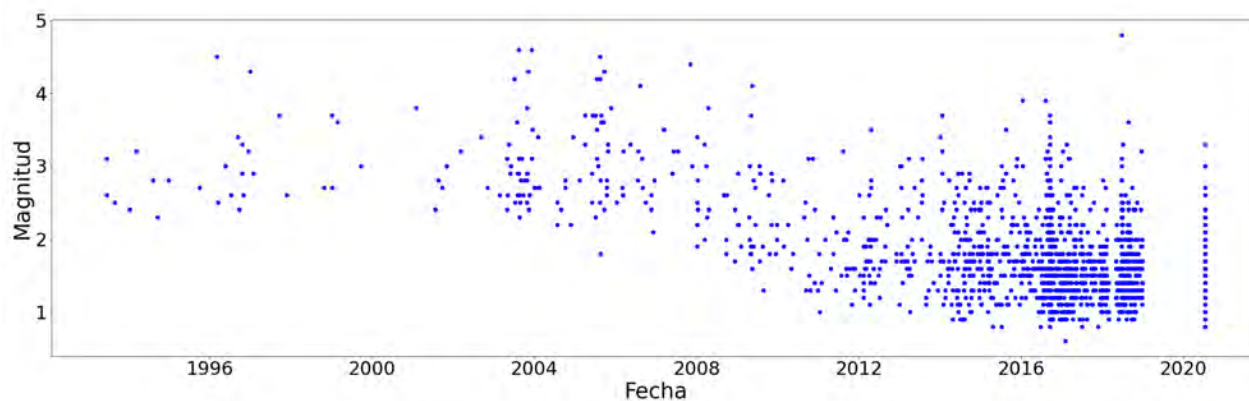


Figura 127: Registro sismicidad histórica municipio de Dabeiba

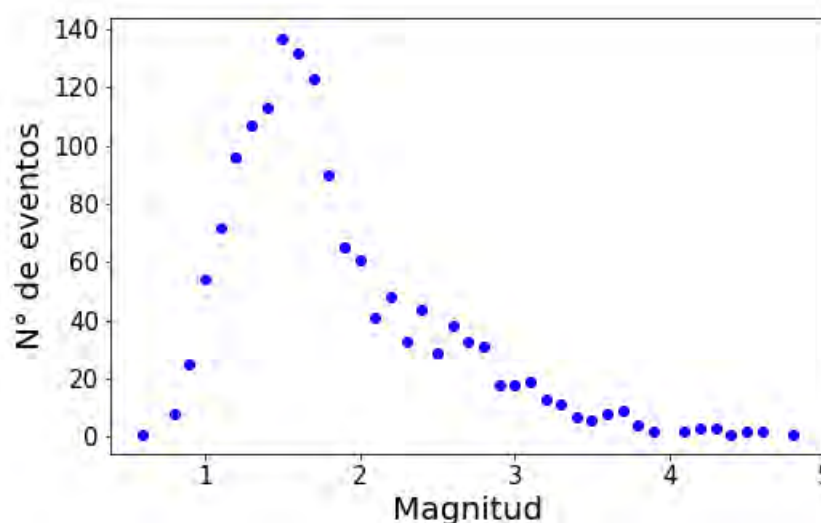


Figura 128: Sismicidad histórica municipio de Dabeiba

8.7.1.1. Sismo del 26 de septiembre de 1970 ($M_w=6,6$)

Tres fuertes sismos se presentaron aquel día, el primero a las 7:02 am, siendo el segundo el de mayor magnitud (9:57 am); teniendo como epicentro el municipio de Bahía Solano. Los principales daños fueron agrietamiento y colapso en viviendas y edificaciones, ruptura de tubos del sistema de acueducto, deslizamientos en las laderas cercanas y agrietamiento en las vías de la población. El tercer sismo se presentó a las 10:38 pm causando pánico en la comunidad; entre el 26 y 27 de septiembre se registraron más de 15 réplicas con magnitudes mayores o iguales a 4. En el municipio de Dabeiba se manifestó con una intensidad de 6 (EMS-98) provocando daños leves.

8.7.1.2. Sismo del 30 de agosto de 1977 ($M_w=6,5$)

Aunque el sismo fue sentido en gran parte del país, solo se reportaron daños en Apartadó (epicentro), Chigorodó, Dabeiba, Necoclí y Turbo en el Urabá Antioqueño. Con un reporte de una persona fallecida y 19 heridos debido al colapso de edificaciones; en el municipio de Dabeiba provocó daños leves con una intensidad de 6 (EMS-98).

8.7.1.3. Sismos del 17-18 de octubre de 1992 ($M_w=6,6$ - $M_w=7,1$)

Los días sábado 17 y domingo 18 de octubre de 1992 se registraron dos sismos superficiales de magnitud 6,6 (M_w) y 7,1 (M_w) respectivamente, afectando principalmente el Atrato Medio y el Urabá Antioqueño. Los daños más graves se presentaron en Murindó (epicentro), con destrucción total de la mayoría de las construcciones y daños severos en otras localidades entre ellas Dabeiba. El evento detonó fenómenos naturales como licuación de suelos, agrietamientos y deslizamientos (pérdida de cobertura vegetal y obstrucción de cauces) a los largo cientos de kilómetros. También fue detonada la explosión del volcán de lodo Cacahual del municipio de Turbo, el cual arrojó $50.000 m^3$ de lodo caliente que sepultó viviendas y causó algunos daños en la cobertura vegetal, cultivos y animales de la zona; en el municipio de Dabeiba 50 viviendas quedaron destruidas, con daños graves en siete veredas y se generaron deslizamientos que obstruyeron la vía Dabeiba-Mutatá. El sismo causó daños severos con una intensidad de 8 (EMS-98).

8.7.2. Metodología - Bloque deslizante 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. La evaluación de la amenaza por movimientos en masa detonados por sismo se realizó 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 planar infinitamente larga paralela a la superficie; el método permite analizar como una ladera podría comportarse durante un evento sísmico, mediante el cálculo del desplazamiento de una masa considerando la aceleración crítica a_c como efecto de la carga sísmica y FS .

El método de Newmark realiza un análisis de estabilidad de la ladera como un bloque (masa) que se desliza por una superficie de falla bien definida e idealizada como un plano inclinado, considerando como unidad de análisis un elemento vertical de ancho b y altura z . El bloque se desplaza hacia abajo debido a la aceleración crítica rompiéndose el equilibrio estático entre el bloque y la superficie inclinada (Figura 129) (Jibson, Harp, y Michael, 2000).

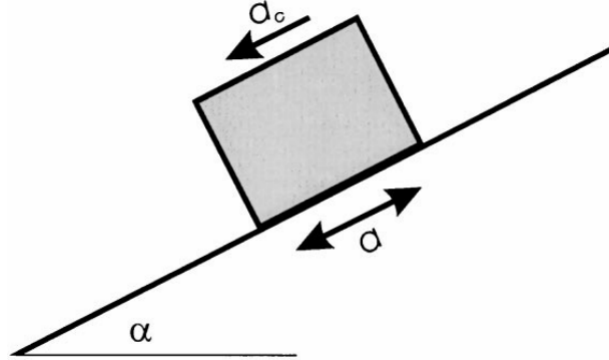


Figura 129: Bloque deslizando método de Newmark
(Jibson y cols., 2000)

Durante un evento sísmico se genera un desplazamiento del bloque superando la fuerza cortante debido a una fuerza sísmica (a) en la base, por lo que este se desplaza debido a la aceleración crítica, la cual Newmark (1965) expresa en función del factor de seguridad estático y la geometría de la ladera.

$$a_c = (FS - 1) \cdot \sin \alpha \quad (8.18)$$

Donde FS es el factor de seguridad en condiciones estáticas y α 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.

$$FS = \frac{c'}{\gamma \cdot t \cdot \sin \alpha} + \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} - \frac{m \cdot \gamma_w \cdot \tan \phi'}{\gamma \cdot \tan \alpha} \quad (8.19)$$

Donde:

c' : Cohesión efectiva [kPa]

t : Altura del elemento vertical $[m]$
 γ : Peso específico del suelo $[kNm^{-3}]$
 γ_w : Peso específico del agua $[kNm^{-3}]$
 α : Ángulo de inclinación de la ladera $[^\circ]$
 m : Porción saturada de t $[m]$
 ϕ' : 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.

$$\log D_N = 0,215 + \log \left[\left(1 - \frac{a_c}{PGA} \right)^{2,341} \cdot \left(\frac{a_c}{PGA} \right)^{-1,438} \right] \pm 0,510 \quad (8.20)$$

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 Dabeiba se presenta un rango de 0,3 a 0,5 considerando un periodo de retorno de 475 años con una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años (https://srvags.sgc.gov.co/jsviewer/Amenaza_Sismica_2020/).

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

$$h_i = h_{max} \left[1 - \frac{\tan \theta_i \cdot \tan \theta_{min}}{\tan \theta_{max} \cdot \tan \theta_{min}} \cdot \left(1 - \frac{h_{min}}{h_{max}} \right) \right] \quad (8.21)$$

Donde θ_{max} y θ_{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 ϕ , peso unitario γ_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 (2010) y los rangos de valores de parámetros geotécnicos recopilados en <http://www.geotechdata.info/parameter/>. En la Tabla 50 se presenta la parametrización geotécnica de cada unidad geotécnica homogénea en donde las propiedades de resistencia e hidráulicas se consideran constantes ajustada al tipo de suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS) correspondiente a las unidades geológicas superficiales (Figura 4).

Tabla 50: Parámetros geotécnicos para las unidades geológicas superficiales.

Unidad	Tipo de suelo	c' (kPa)	ϕ°	$\gamma_s(kN/m^3)$	$k_s(m/s)$
JRK1du	CL	16	27	18	$5,0 \times 10^{-8}$
K2alu	SM	15	30	18	$5,4 \times 10^{-6}$
K2cn	SM	15	30	18	$5,4 \times 10^{-6}$
K2pmn	SC	15	30	19	$5,0 \times 10^{-7}$
Qal	SW	0	38	20	$8,4 \times 10^{-5}$
Qat	SW	0	35	21,5	$5,0 \times 10^{-4}$
Qv	SW-SM	5	38	21	$8,4 \times 10^{-5}$

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:

- 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 130 se observa la amenaza por movimientos en masa detonadas por sismo. Los resultados de amenaza son fuertemente influenciados

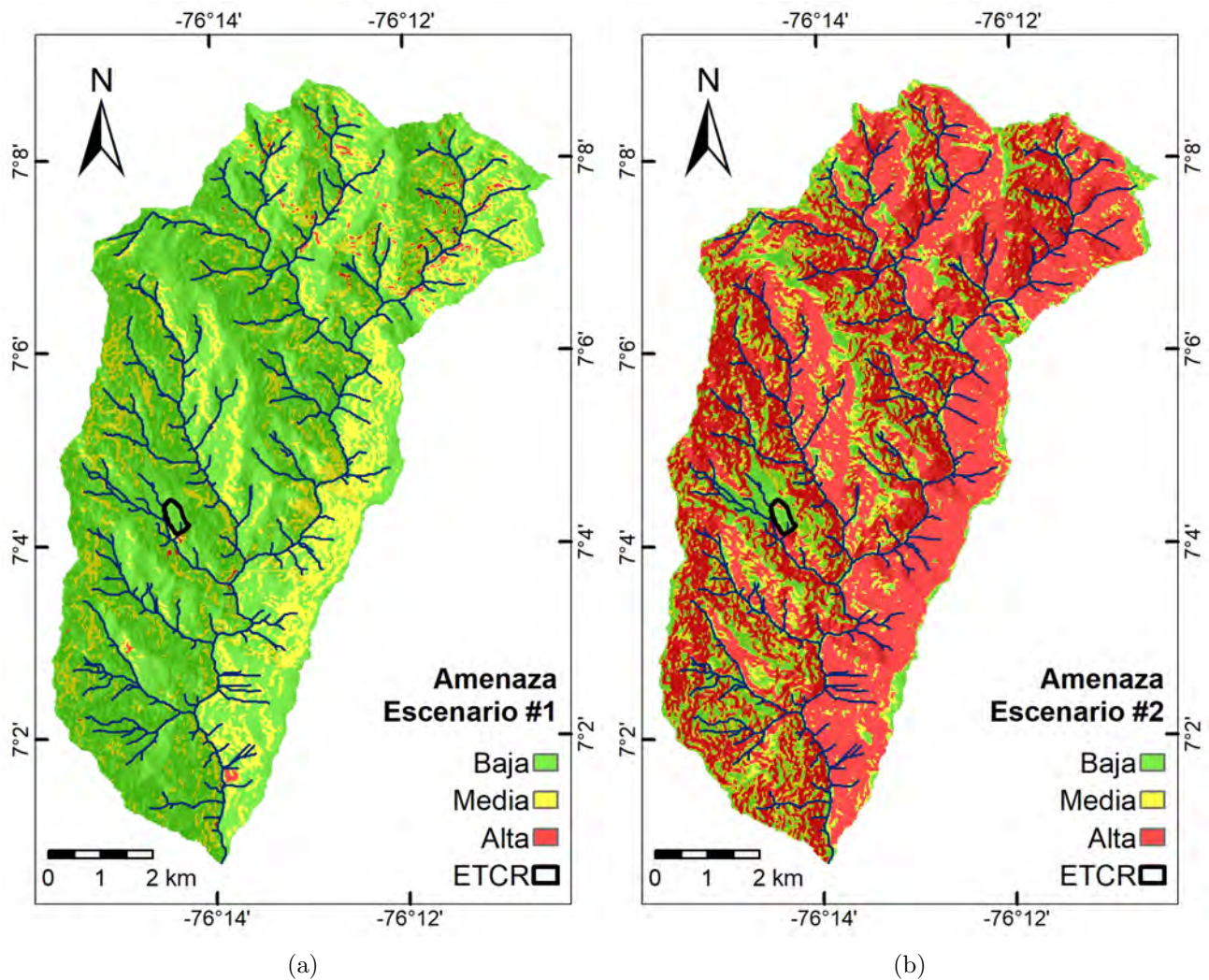


Figura 130: Amenaza por movimientos en masa detonados por sismo. a) Escenario #1 condición seca. b) Escenario #2 condición saturada.

por las altas pendientes del terreno y se observa su relevancia en la Tabla (37). Las laderas con mayor pendiente se localizan en la zona este de la cuenca, las cuales se encuentran bajo la amenaza media en el escenario donde el terreno se encuentra seco durante un evento sísmico; la amenaza alta solo representa el 0,85 % en este escenario. En la condición más crítica en la que el terreno se encuentra saturado y ocurre un evento sísmico el 64,4 % de la cuenca se clasifica dentro de amenaza alta. Se evidencia como la saturación del terreno eleva considerablemente los desplazamientos superando la condición, de estabilidad en la condición seca. Se observa como en la Figura 78 estas zonas fueron clasificadas como susceptibles a movimientos en masa en el PBOT del municipio de Dabeiba.

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 escenarios (seco y húmedo), se utilizaron ambos, pero modificando la amenaza alta del escenario saturado a amenaza media. Ya que dicho valor representa un escenario extremo y con periodo de retorno cercano a 500 años. Para el mapa de amenaza por lluvia como factor detonante se conservaron las zonas incondicionalmente inestables e incondicionalmente estables como de amenaza alta y baja respectivamente. Y las celdas con un potencial de fallar ante diferentes escenarios de lluvia se definieron como de amenaza media. Esto permite considerar todos los periodos de retorno de la precipitación en dicho mapa. Es importante resaltar, como se explicó previamente, que dicho mapa corresponde a un escenario de lluvia intensa y que abarca espacialmente una micro-cuenca del área de influencia. Este escenario es poco probable que se desarrolle con dichas intensidades sobre toda la cuenca simultáneamente. Los gradientes de energía necesarios para este tipo de eventos convectivos se presenta en celdas de pocos kilómetros cuadrados. Sin embargo, si es posible que dichos eventos se presenten espacialmente en cualquiera de las microcuencas de la zona de influencia.

La Figura 131 presenta el mapa de amenaza por movimientos en masa combinando los diferentes escenarios del factor detonante.

Las áreas con amenaza alta por movimientos en masa ocupa el 49 % del área total que se concentra sobre el costado derecho de la quebrada Chimiadó, aguas abajo. Los materiales que conforman la cuenca se presentan alterados y afectados por procesos tectónicos y de meteorización, lo cual otorga a los drenajes un alto poder de encisicón. También sobre la vía que conduce a la vereda Llano Grande desde la cabecera municipal de Dabeiba, ubicada sobre dicho costado, se observan deslizamientos activos debido al corte de la vía y a las estructuras de foliación que posee la roca, generando planos de preferentes de debilidad.

Las áreas con amenaza media ocupan el 48 % del área total y se presentan hacia el costado izquierdo y parte más alta de la quebrada Chimiadó. Por su parte las zonas con amenaza baja ocupan el 3 % del área total y se presenta en

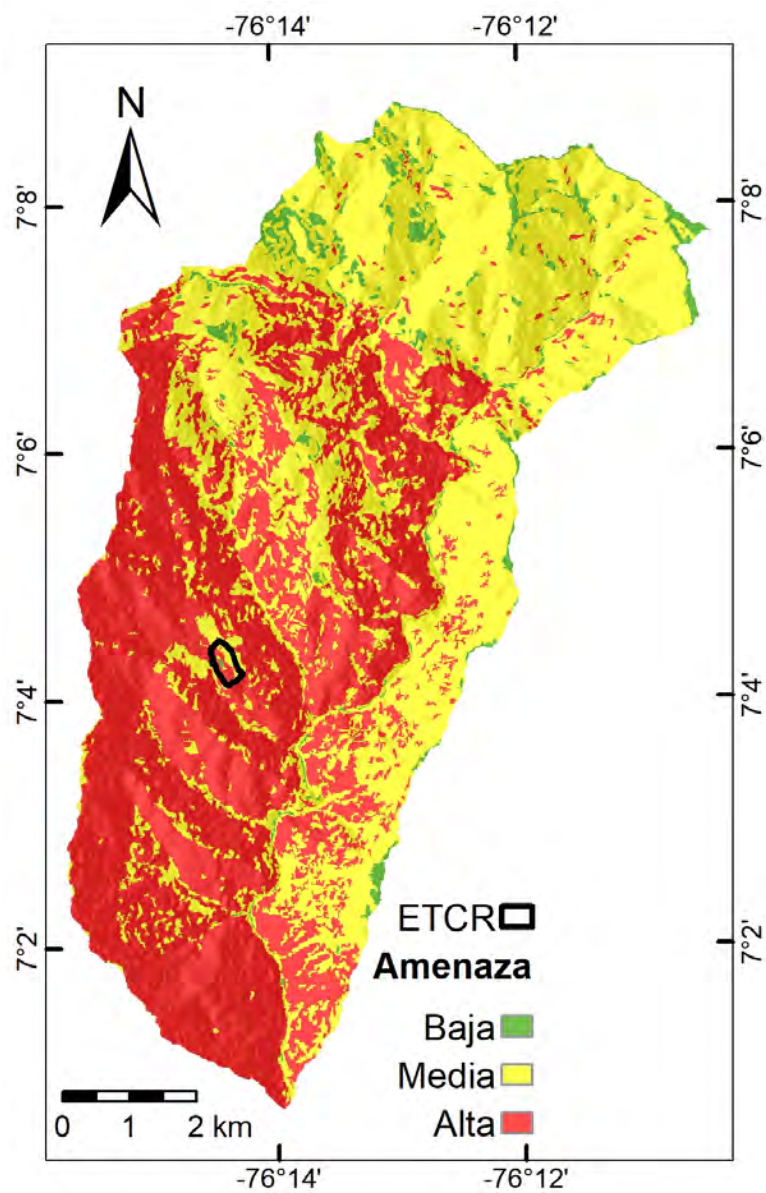


Figura 131: Mapa de amenaza por movimiento en masa para el antiguo ETCR Llano Grande

pequeñas áreas dispersas, distribuidas principalmente hacia la parte alta de la cuenca.

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, . M. R., P. M. (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. (1944). 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.
- Caballero Acosta, H., Mejía Peláez, I., y (SGC), S. G. C. (1992). *Investigación histórica y de campo del derrumbe el revenidero ocurrido en octubre de 1970, municipio de Uramita*. Medellín, Colombia: Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS) 2004-2011,. Descargado de <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=Investigaci%C3%B3n%20hist%C3%B3rica%20y%20de%20campo%20del%20derrumbe%20el%20revenidero%20occurrido%20en%20octubre%20de%201970>
- 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.

- Corpourabá. (2010). *Zonificación de amenazas y riesgos de origen natural y antrópico del área urbana del municipio de dabeiba como herramienta fundamental en la planificación del territorio* (Inf. Téc.).
- Corpourabá. (2019). *POMCA Rio Sucio Alto* (Inf. Téc.).
- 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.
- 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.
- 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. (2010). *Memoria Explicativa Geología de la parte oriental de la plancha 114 Dabeiba* (Inf. Téc.). Medellín: INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA.
- 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.
- 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. (1986). Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic

- analysis. *Water Resources Research*, 22(5), 794–804.
- 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. (2013). *Geología de la Plancha 114 Dabeiba* (Inf. Téc.).
- SGC. (2015). *Memoria explicativa de Zonificación de la Susceptibilidad y la Amenaza relativa por Movimientos en Masa, escala 1:100.000, Plancha 114 Dabeiba escala 1:100.000 departamentos de Antioquia y Choco*. (Vol. 13; Inf. Téc. n.º 3). Bogotá: Autor.
- 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. (1993). Application of geographic information systems to landslide hazard zonation.
- van Westen, C. J., Castellanos, E., y Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Eng. Geol.*, 102(3-4), 112–131. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010> doi: 10.1016/j.enggeo.2008.03.010
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *Special report*, 176, 11–33.
- Zhu, J., Miller, A. E., Lindsay, C., Broderson, D., Heinrichs, T., y Martyn, P. (2013). *Modis ndvi products and metrics user manual*. Version.

Capítulo 9

Amenaza por Inundaciones

Introducción

Las inundaciones están asociadas a procesos hidrológicos de lluvias persistentes que aumentan el nivel de las aguas de escorrentía y pueden repercutir en eventos amenazantes. Estos eventos hacen parte de la dinámica de una corriente (IDEAM, 2014).

Para llevar a cabo la zonificación de la amenaza por inundación, se debe realizar una caracterización hidrológica de la cuenca hidrográfica objeto de estudio y la estimación de las descargas pico como respuesta a eventos de lluvias intensas, mediante parámetros morfométricos se estiman tiempos de concentración, luego con información de curvas intensidad – frecuencia – duración (IDF) se obtienen las intensidades de la tormenta de diseño para los diferentes períodos de retorno.

Es necesario posteriormente, realizar el tránsito hidrológico de la tormenta planteada a través de modelos lluvia escorrentía los cuales, para las cuencas objeto de estudio se proponen hidrógrafas unitarias.

9.1. Estudios previos

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 Antioquia, escala 1:100.000, evento La Niña años 1988-2000-2011-2012 (IDEAM, 2014): 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 Antioquia generó los mapas de inundación que

mostró eventos en ciertas zonas del departamento. Para los años 1988 y 2000 se visualizan eventos cercanos a el antiguo ETCR Llano Grande, sin embargo, para los años 2011 y 2012 en el mismo lugar no se muestran eventos de inundación visibles a esa escala para la zona de interés.

9.2. Definición del área de influencia para la evaluación de la amenaza por Inundación

Las inundaciones se presentan por emplazamiento paulatino o violento de las aguas y sedimentos en cantidades abundantes sobre una determinada superficie que normalmente no está sumergida, con duración, frecuencia, magnitud e intensidad determinada por la interacción entre el tipo de inundación y las características morfoestructurales y culturales del lugar, la manifestación de este evento de origen natural; algunos por su periodicidad, violencia y daños causados al hombre; se convierten en fuertes limitantes para los procesos antrópicos (Lage, 1997).

Para la elaboración de los estudios básicos de amenaza por inundación inicialmente se procedió a definir una o varias áreas de influencia clasificadas por el comportamiento hidrológico que afecta el predio del antiguo espacio territorial Llano Grande, lo que permite tener un acercamiento regional al área de interés, frente a la amenaza por inundación.

Los límites de afectación superficial por procesos hidrológicos de lluvias que hacen que aumenta de manera diferencial el nivel de las aguas de escorrentía de esta unidad básica de estudio son establecidos inicialmente utilizando los cambios definitivos de pendiente que forman depresiones claramente visibles en el terreno, tales cambios superficiales suelen ser cuchillas y drenajes. Está área es posteriormente ajustada considerando las unidades geológicas superficiales y sus estructuras.

La zona de estudio comprende un área de 188,300 ha en una topografía quebrada y de pendientes superiores al 50 % de su área, las condiciones del terreno hace que se tengan dos cuencas al interior del antiguo ETCR Llano Grande delimitadas por un control de pendientes, las cuencas se van a identificar como cuenca Llanogrande y cuenca Chimiadó, la cuenca Llanogrande esta contenida dentro de la de mayor tamaño, tiene un área de 373,3 ha y esta ubicada sobre el eje de la quebrada Llanogrande, (Figura 79), la segunda cuenca o cuenca Chimiadó, con una extensión de 7600 ha, es bañada por las quebradas La Mina, José Dolores, Chimiadó, Buena Vista, El Salado, La Chimia y El Retiro entre

otras, con una altura máxima de 3000 msnm aproximadamente hacia el norte y desciende hacia el sur hasta cerca de los 520 msnm en el río Urama (Figura 132).

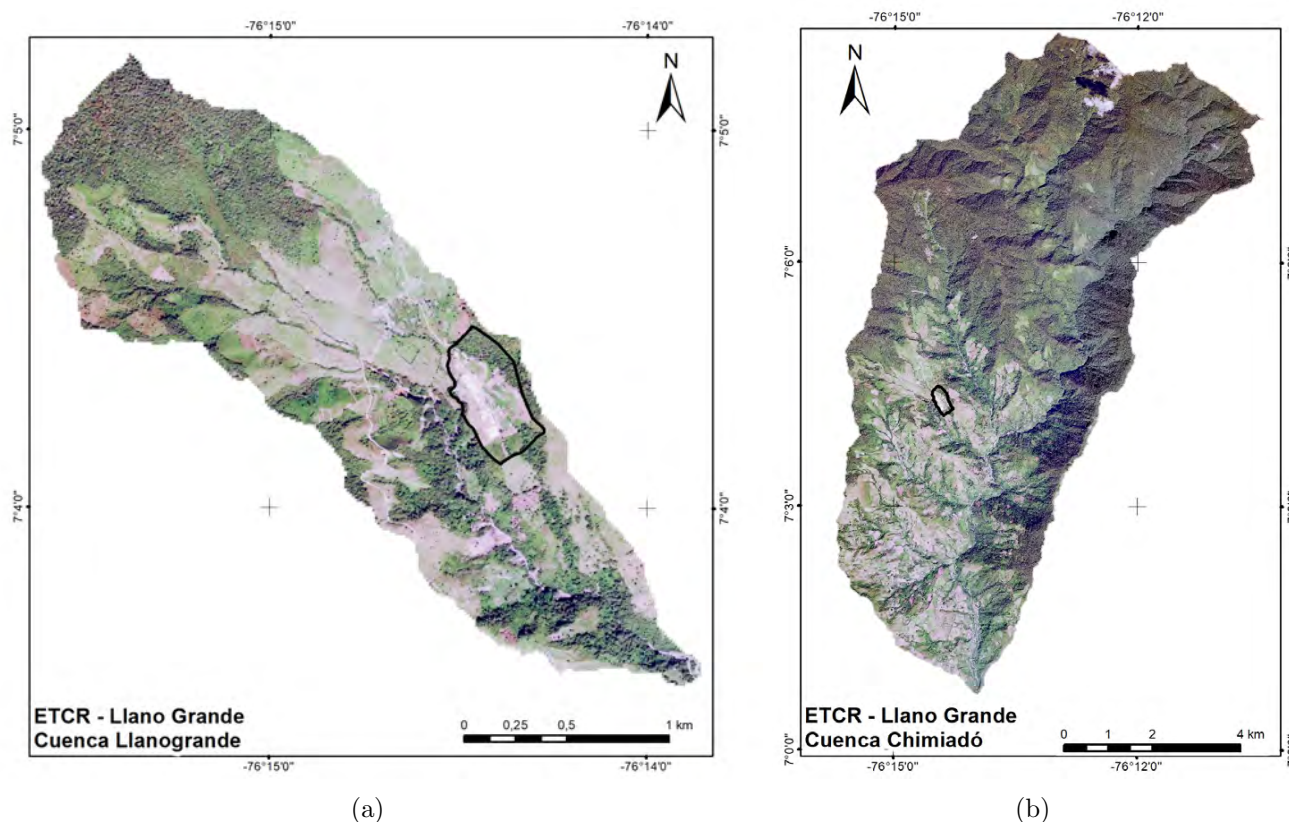


Figura 132: Cuencas Llanogrande y Chimiadó

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 Dabeiba 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 Llano Grande. Durante el periodo comprendido entre 1970 y el año 2010, el municipio de Dabeiba registró en el catálogo del DesInventar un total de 17 eventos de tipo inundación, lo cual representa el 22,4 % de los reportes (teniendo en cuenta solo eventos tipo movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales). Estos han afectado a cerca de 2.280 personas y han ocasionado la muerte de dos personas.

Por otro lado en documentos relacionados con la planificación del territorio

como el SGC (2013) resalta una serie de inundaciones en las quebradas La Seca, El Tigre, Palo Huevo y Camparrusia durante la temporada invernal de 2008, lo que ocasionó el colapso de diez casas en el corregimiento de Camparrusia y cinco en la vereda Agua Linda.

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 morfológicas 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 51.

Los valores de tiempo de concentración estimados para el antiguo ETCR se presentan en la Tabla 52.

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 IDF para los diferentes períodos de retorno en las cuencas hidrográficas se muestran a continuación en la Figura 133, 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 Cuencas A y B se muestran posteriormente en la Figura 134.

Tabla 51: 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 ²] L : Longitud del cauce principal [Km] S : Pendiente promedio del cauce principal [m/m]
Gianndotti	$T_c = \frac{4\sqrt{A+1,5L}}{25,3\sqrt{S \cdot L}}$	T_c : tiempo concentración [horas] A : Área de la cuenca [Km ²] 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 ²] S : Pendiente promedio del cauce principal [m/m]

Tabla 52: Tiempos de concentración

AETCR	Cuenca	Tiempo de Concentración [minutos]						
		Témez	Kirpich	California	Passini	Gianndotti	Clark	tc
Llano Grande	Llanogrande	72,82	21,76	19,57	34,31	33,89	67,98	41,72
	Chimiadó	263,92	92,56	85,98	224,64	104,39	506,08	212,93

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 histograma 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 135.

El histograma de lluvia distribuida para período de retorno de 100 años se presenta a manera de ejemplo a continuación en la Figura 136 para la Cuenca Llanogrande.

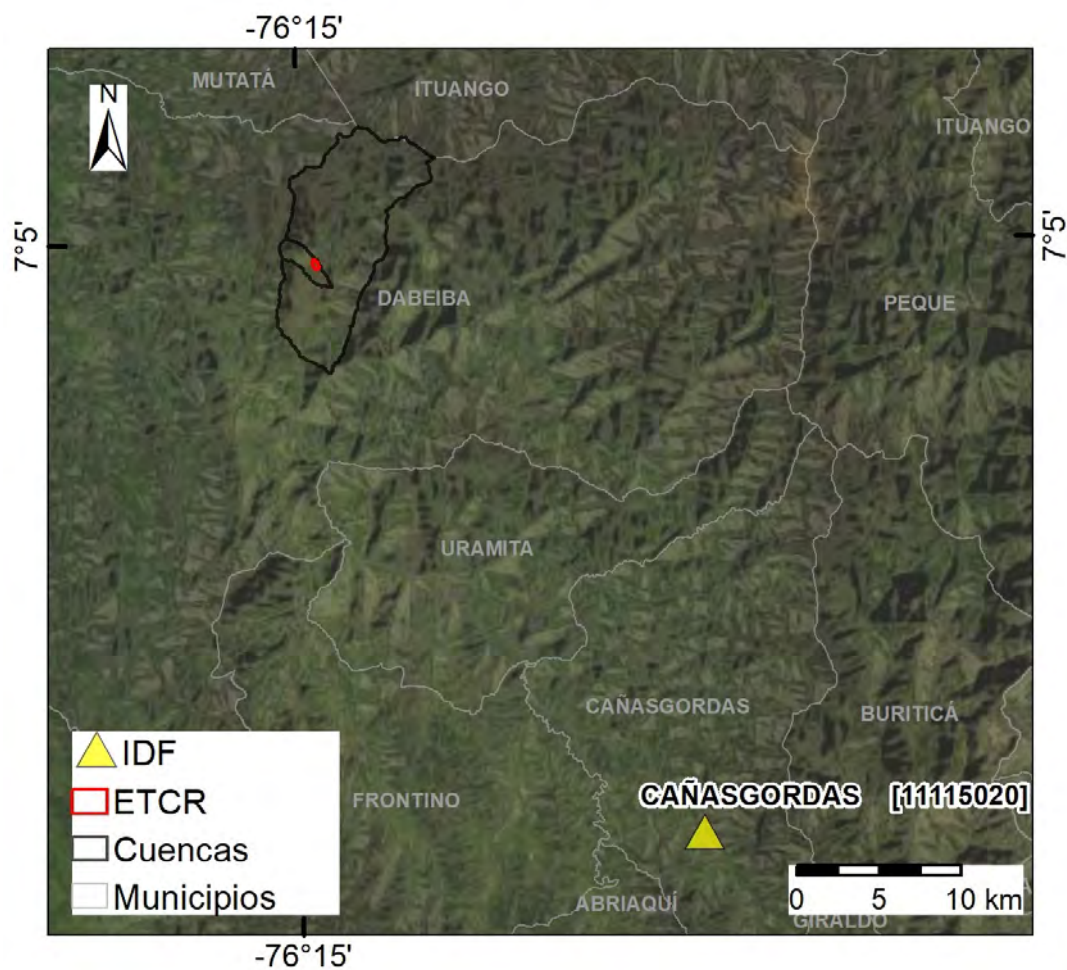


Figura 133: Ubicación de Estaciones pluviográficas

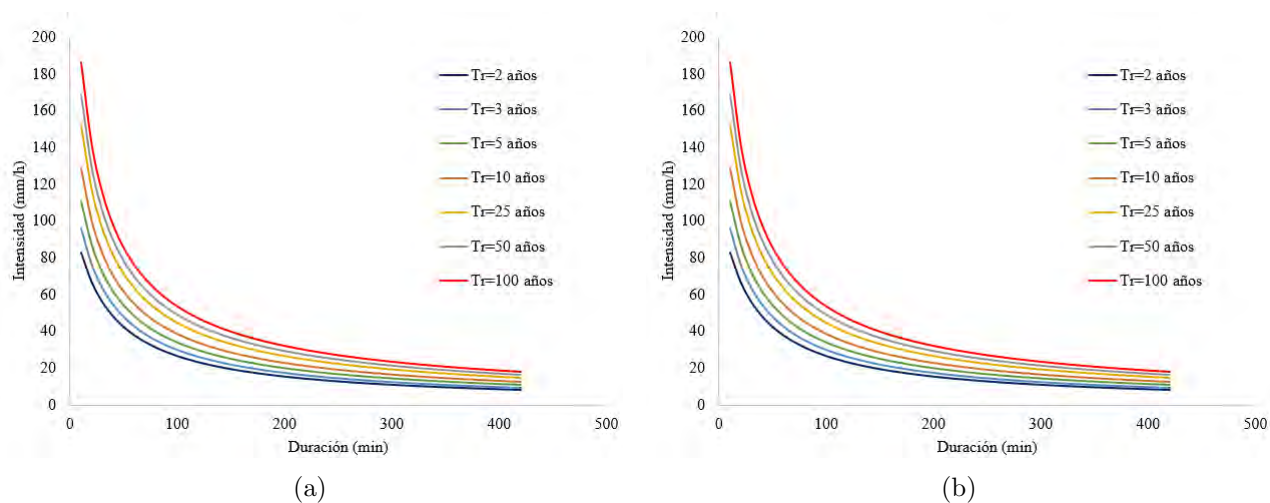


Figura 134: Curvas IDF: (a) Cuenca Llanogrande y (b) Cuenca Chimiadó

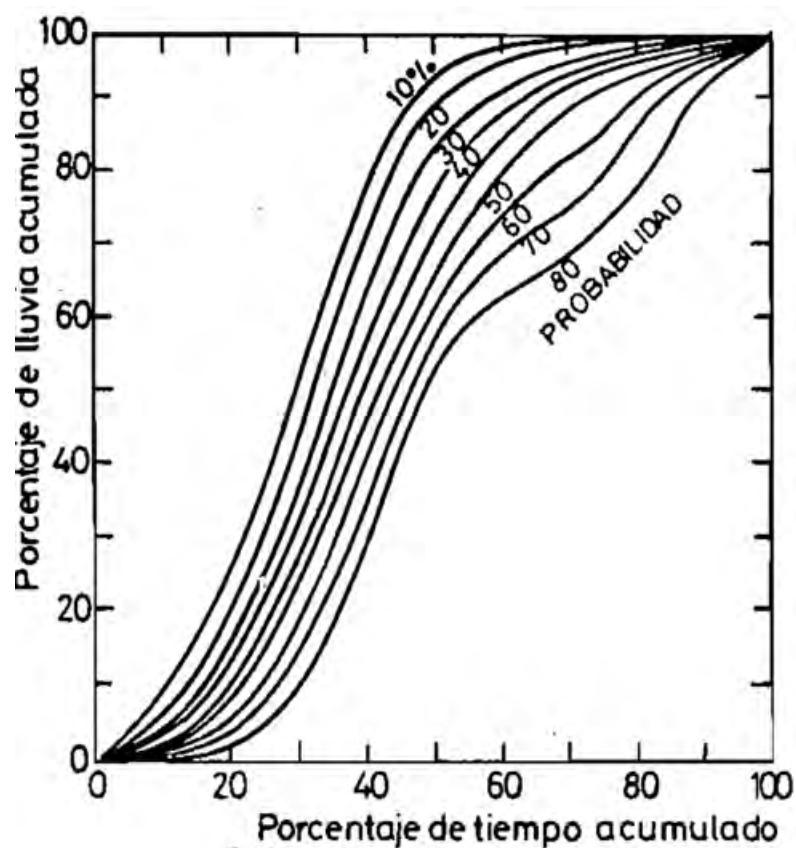
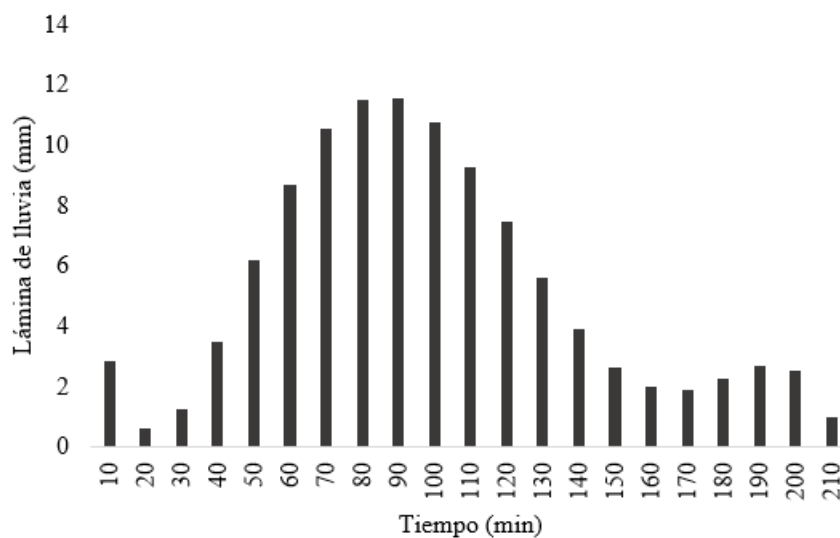


Figura 135: Diagrama de Huff para grupo de tormentas II


 Figura 136: Histograma de precipitación de diseño Cuenca Llanogrande $T_r=100$ años

9.4.4. Estimación de la infiltración

De la lluvia que cae sobre la cuenca en un evento de precipitación intensa, solo una parte se convierte directamente en escorrentía superficial, la parte

restante se intercepta por la vegetación, es almacenada en depósitos o se infiltra en el terreno, a este segundo grupo se le conoce con el término de pérdidas hidrológicas y su estimación es fundamental para la el cálculo de caudales pico mediante modelos lluvia escorrentía.

Para la estimación de las pérdidas hidrológicas se utiliza la metodología de abstracción inicial (I_a) para representar el agua que no es susceptible de ser infiltrada o escurrida superficialmente, como lo es el agua interceptada por la vegetación. La infiltración es calculada mediante la suposición de que la capacidad de infiltración es constante para todo evento de lluvia y se estima a partir del índice de infiltración media ϕ . 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 ϕ 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 53 y 54 se presenta el valor ponderado del número de curva CN para las cuencas Llanogrande y Chimiadó respectivamente y en la Tabla 55 se presenta el valor del coeficiente de infiltración y abstracción inicial del suelo para ambas cuencas.

Tabla 53: Estimación del número de curva de la Cuenca Llanogrande

Cuenca Llanogrande			
Cobertura	Área [Km ²]	% Área	CNII
Urbano	0,012	0,33	90
Bosque	1,849	49,52	70
Pastos	1,433	38,40	74
Suelo desnudo	0,439	11,75	82
CNII Ponderado			73

Tabla 54: Estimación del número de curva de la Cuenca Chimiadó

Cuenca Chimiadó			
Cobertura	Área [Km ²]	% Área	CNII
Urbano	0,020	0,03	90
Bosque	54,439	71,37	70
Pastos	15,146	19,86	74
Suelo desnudo	6,667	8,74	82
CNII Ponderado			72

Tabla 55: Parámetros de pérdidas por infiltración

AETCR	Cuenca	Ia [mm]	ϕ [mm/h]
Llano Grande	Llanogrande	18,78	10,00
	Chimiadó	19,90	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.

$$R = 16,4L^{0,342}S^{-0,790} \quad (9.2)$$

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 y 57 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 Llanogrande

Cuenca Llanogrande								
Tr [años]	2	3	5	10	25	50	100	500
QMáx [m ³ /s]	19,2	26,4	34,4	44,7	57,8	67,1	76,7	100,9

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

Cuenca Chimiadó								
Tr [años]	2	3	5	10	25	50	100	500
QMáx [m ³ /s]	115,2	160,3	211,5	278,9	367,7	432,3	499,7	658,2

9.5. Zonificación de manchas de inundación a escala de cuenca

La estimación de manchas de inundación a escala de cuenca se realiza a partir los diferentes caudales máximos. Las manchas de inundación se zonifican a partir del descriptor geomorfológico HAND por sus siglas en inglés *Height Above Nearest Drainage*, el cual es una normalización del DEM de acuerdo con la distancia vertical relativa al drenaje más cercano siguiendo las direcciones de drenaje. Asociado con niveles de inundación definidos a partir de curvas de calibración (nivel vs caudal).

La obtención del HAND parte de la red de drenaje, el mapa de direcciones de flujo y el DEM, estos dos primeros mapas permiten identificar la celda destino sobre la red de drenaje de cualquier celda, lo que permite calcular la elevación relativa como la diferencia entre la elevación de una celda determinada y la elevación de su celda destino sobre el canal. En la Figura 137 se ilustra la obtención del HAND (Rennó y cols., 2008).

Se utiliza como curva de calibración la regionalización de geometría hidráulica desarrollada por Mejía y Posada (2002) para ríos de montaña a través del análisis de diferentes bancos de datos en todo el país. La expresión para la curva de calibración viene dada por la Ecuación 9.3:

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

A continuación, en las Figuras 138 y 139 se presenta el descriptor geomorfológico HAND para las cuencas Llanogrande y Chimiadó respectivamente. En la Figura 140 el calado resultante de la distribución del caudal máximo distribuido en la red de drenaje a manera de ejemplo en la cuenca Llanogrande para 500 años de período de retorno.

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

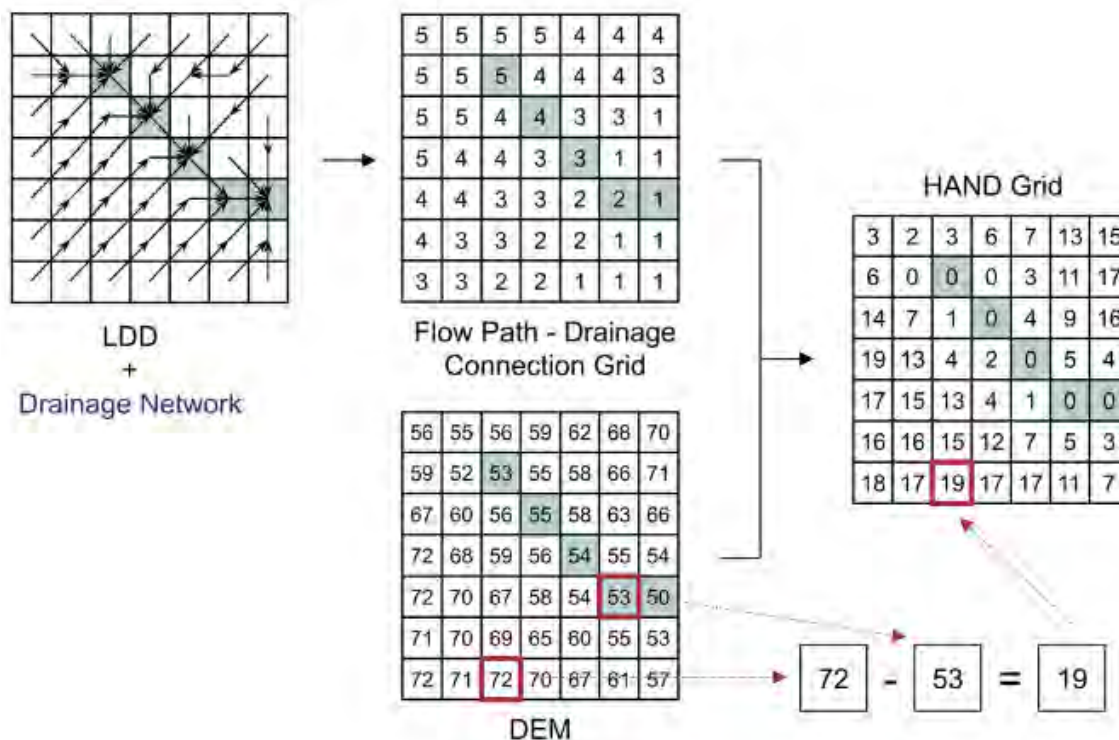


Figura 137: Descripción HAND, fuente: (Rennó y cols., 2008)

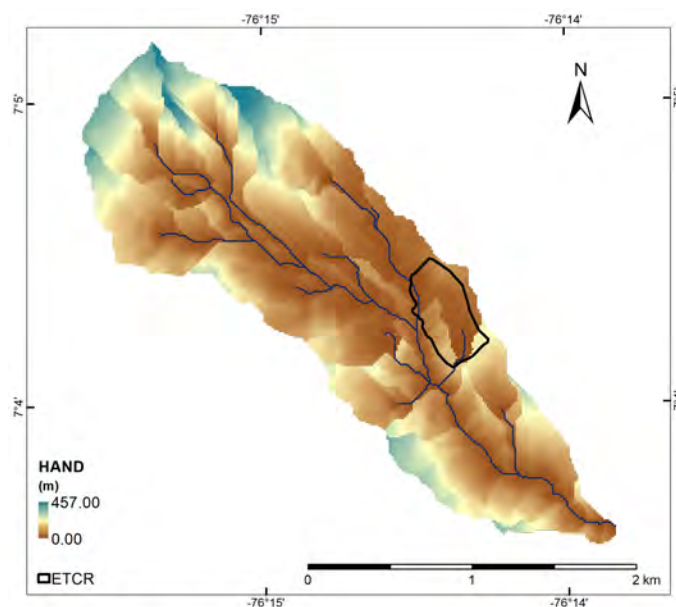


Figura 138: HAND cuenca Llanogrande

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

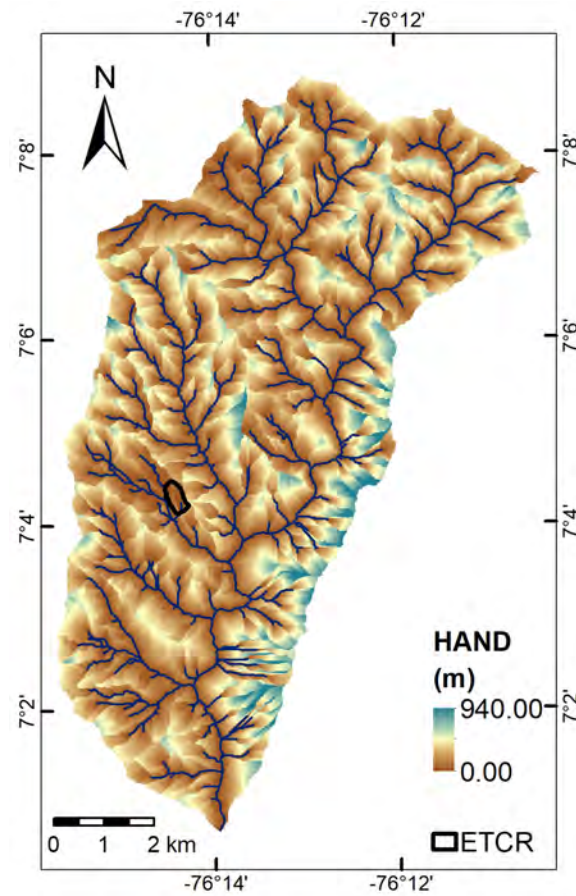


Figura 139: HAND cuenca Chimiadó

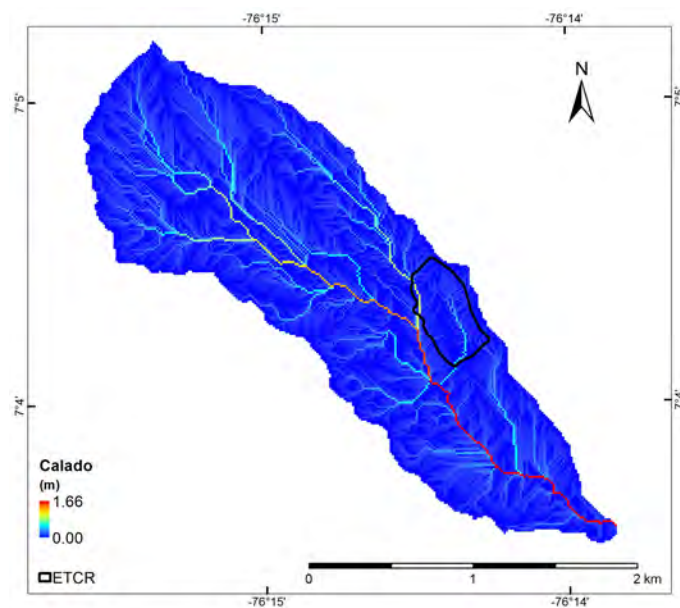


Figura 140: Ejemplo - calado cuenca Llanogrande

- Amenaza media asociada al período de retorno de 100 años
- Amenaza alta asociada al período de retorno de 10 años.

En la Figura 141 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.

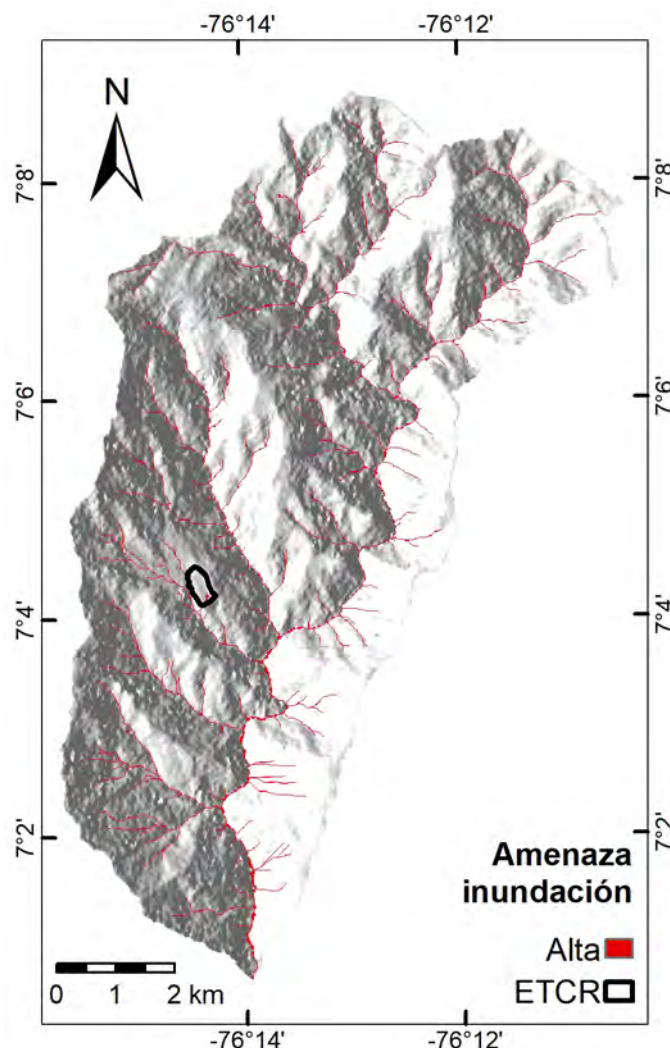


Figura 141: Zonificación de amenaza por inundación

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 metodología frente a la escala de trabajo, por su parte el antiguo ETCR se encuentra aparentemente influenciado por encontrarse en las inmediaciones de la quebrada El Silencio y el río Llano Grande, el río Chimiadó no parece represen-

tar amenaza por inundación para el predio. 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). *Hidrologia Aplicada*.
- IDEAM. (2014). Estudio Nacional del Agua 2014.
- Lage, M. S., Antonio Flórez and Bejarano. (1997). Génesis y manifestaciones de las inundaciones en Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 6(1), 60–110.
- Mejía, y Posada. (2002). GEOMETRÍA HIDRÁULICA PARA CORRIENTES ESTABLES DE LA ZONA ANDINA COLOMBIANA. *XV SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA – MEDELLÍN 2002*.
- Montoya, J. J., y Patiño, J. E. (2001). Estudio hidrometeorológico y geomorfológico de diez quebradas del Valle de Aburrá. *Universidad EAFIT*.
- Rennó, C. D., Nobre, A. D., Cuartas, L. A., João 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*.
- SGC. (2013). *Geología de la Plancha 114 Dabeiba* (Inf. Téc.).
- Smith, R., y Vélez, M. V. (1997). *Hidrología de Antioquia*. Medellín.
- USACE. (2016). Hydrologic Engineering Center, Hydrologic Modelling System HEC-HMS. User's Manual (version 4.2, August 2016). *Hydrologic Engineering Center* (August).
- USGS. (2016). Equations for Estimating Clark Unit-Hydrograph Parameters for Small Rural Watersheds in Illinois. *Water-Resources Investigations Report 00-4184*.
- Vargas, E. (1985). Influencia del hidrograma de una tormenta en la crecida resultante. *Universidad Católica de Chile*.

Capítulo 10

Amenaza por Avenidas Torrenciales

Introducción

Las avenidas torrenciales se definen como flujos formados por una mezcla de agua y sedimentos en diferentes proporciones, que se desplaza a grandes velocidades a lo largo de cauces en cuencas de montaña, y que tienen como causas detonantes la presencia de uno o varios de los siguientes eventos: lluvias concentradas intensas o lluvias antecedentes; enjambre de movimientos en masa; sismos; rotura de presas naturales o artificiales; o aporte de grandes volúmenes de agua por deshielo (Aristizábal, Carmona, y López, 2020). Se caracterizan por su alta capacidad destructiva y tiempos de respuesta muy cortos para la toma de acciones por parte de la población expuesta (Borga, Stoffel, Marchi, Marra, y Jakob, 2014).

Existen tres factores fundamentales que intervienen en la amenaza de una cuenca a generar avenidas torrenciales: la morfometría de la cuenca, la disponibilidad de sedimentos y disponibilidad de agua. Las dos primeras determinan la susceptibilidad, y la disponibilidad de agua establece la amenaza (Figura 142). 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.

10.1. Definición del área de influencia

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.

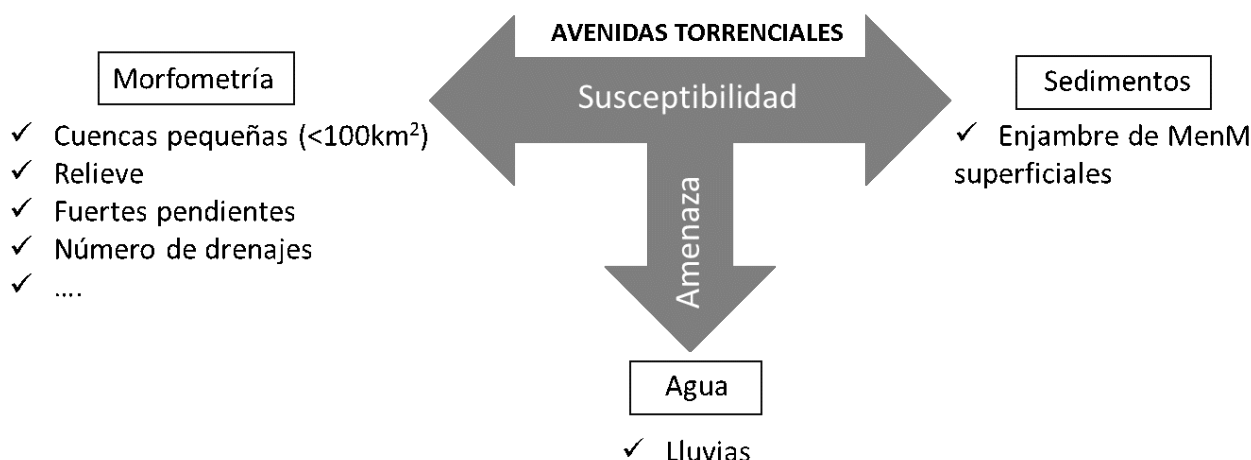


Figura 142: Diagrama conceptual de la evaluación de la amenaza por avenidas torrenciales.

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 antiguo ETCR Llano Grande, lo que permite tener un acercamiento regional al área de interés, frente a la amenaza por avenidas torrenciales.

En la Figura 143 se presentan las dos cuencas delimitadas como áreas de influencia por avenidas torrenciales para el antiguo espacio territorial Llano Grande. La cuenca A tiene un área de 373,3 ha, su cauce principal es uno de los tributarios al drenaje de la cuenca B y adyacente a este se localiza el antiguo ETCR de Llano Grande. El área de la cuenca B es de 7600 ha, su afluente principal es la quebrada Chimiadó, la cual entrega sus aguas al río Urama en cercanías a la cabecera municipal de Dabeiba.

10.2. Catalogo histórico de eventos torrenciales

La realización del inventario histórico por avenidas torrenciales, toma como base de datos los registros disponibles para el municipio de Dabeiba 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 Llano Grande. Durante el periodo comprendido entre 1942 y el año 2018, el municipio de Dabeiba registró en el catálogo del DesInventar 16 eventos clasificados como avenidas torrenciales, las cuales representan el 21,1 % de los reportes totales en el municipio (teniendo en cuenta solo eventos tipo movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales) dejando un saldo de

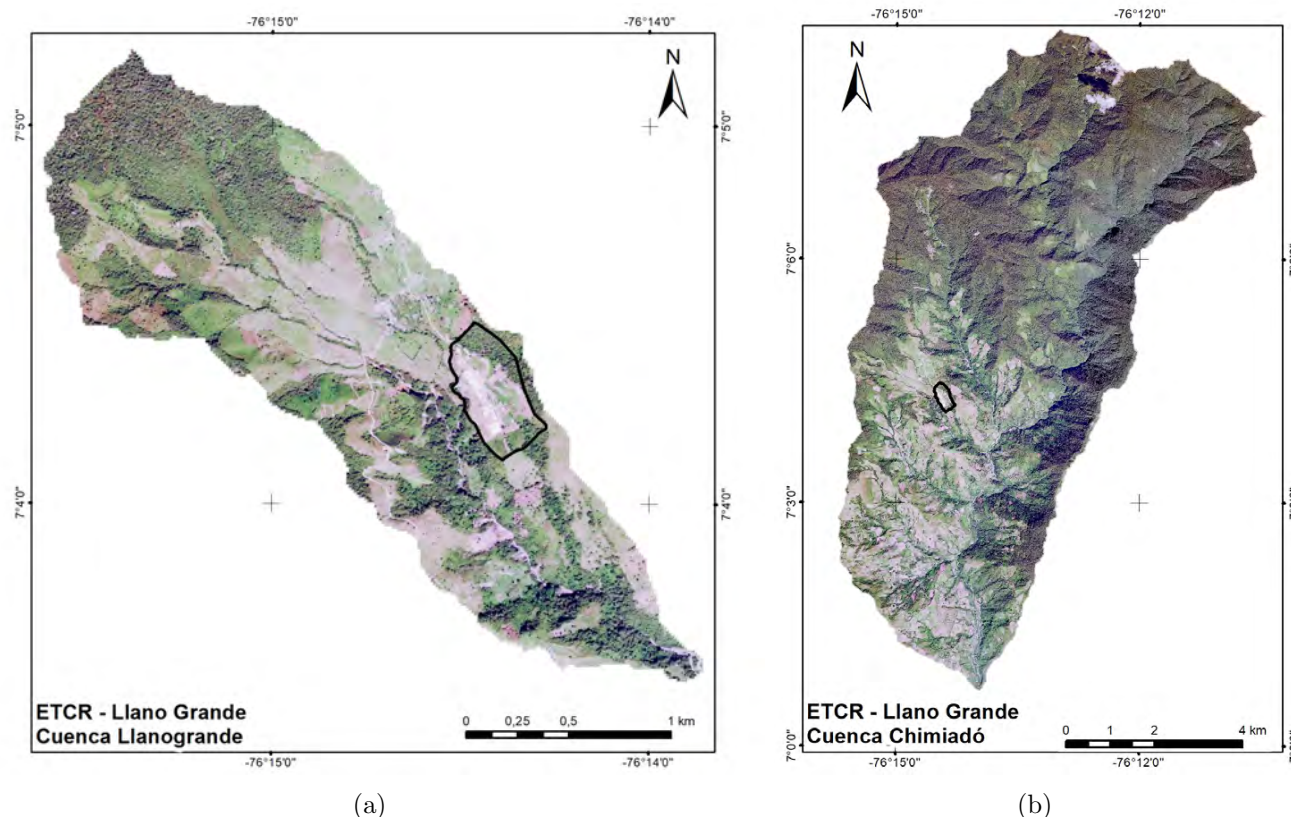


Figura 143: Áreas de influencia para la evaluación de avenidas torrenciales. A) Cuenca A B) Cuenca B

64 personas fallecidas y más de 3000 afectados.

Por otro lado en documentos relacionados con la planificación del territorio como Corpourabá (2010), SGC (2013) y Corpourabá (2019) resaltan eventos que han afectado principalmente la cabecera municipal de Dabeiba. Algunos de estos eventos son:

- El deslizamiento de el Revenidero ocurrido el 25 de octubre de 1970 provocó el represamiento del río Sucio (Caballero Acosta, Mejía Peláez, y (SGC), 1992), una vez que se rompió la presa, se generó un flujo de carácter torrencial que ocasionó la semidestrucción de las partes bajas del municipio de Dabeiba.
- SGC (2013) menciona que la cabecera del municipio de Dabeiba está establecida sobre un complejo de depósitos aluviales y aluviotorrenciales asociados además del río Sucio, a quebradas como El Pital, La Desmontadora, La Clara y la Selva.
- Se reporta una avenida torrencial generada por la quebrada La Desmonta-

dora el 29 de septiembre de 1993, la cual provocó la muerte de aproximadamente 23 personas y dejó más de 700 damnificados

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 65 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) por lo que se adoptó para la realización de este trabajo. Con base en este ordenamiento, se derivan otras variables que ayudan a la interpretación de la red de drenaje, estas se conocen como las Leyes de Horton. (Mantilla y cols., 1998).

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 L_r . 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. 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). 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.

Coeficiente ρ . Definido por Horton (1945), corresponde al cociente entre R_L y R_B . Este coeficiente ha sido considerado de gran importancia para estimar la capacidad de almacenamiento hídrico de la red de drenaje, el cual a su vez es fundamental en la modulación de las intensidades de la cresta de inundación (Horton, 1945). Si ρ 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 ρ es elevado o no, debemos acudir a su relación con R_b y R_l . R_b es inversamente proporcional a ρ , es decir, entre más grande sea el valor de R_b , menos elevado será el valor de ρ . Además R_b tiene un rango de resultados para cuencas naturales $3 \leq R_B \leq 5$. Así pues, se puede decir que si el valor de R_b es próximo a 3 entonces ρ tendrá un valor elevado y por el contrario si R_b es próximo a 5, ρ 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 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 58 representa una clasificación del Ff asociado a una cuenca.

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.

Tabla 58: Características de la cuenca de acuerdo con el valor Ff

Ff	Clasificación
< 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 circularidad (R_c). El coeficiente o relación de circularidad de Miller se calcula a partir del área y el perímetro de la cuenca. Los valores varían entre 0 y 1. En este caso, valores cercanos a 1 indican morfologías ensanchadas, mientras que unos coeficientes de circularidad cercanos a 0, indican que las cuencas son alargadas

Coeficiente de compacidad (C_c). 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 59 muestra tres categorías para la clasificación, de acuerdo con este parámetro:

Tabla 59: Características de la cuenca de acuerdo con el valor de C_c .

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 (R_t). 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 (R_f). Según Melton (1957), la relación entre la longitud del canal principal y la longitud del perímetro de la cuenca es la relación

de aptitud, que es una medida de la aptitud topográfica.

Wandering ratio (Rw). Según Smart y Surkan (1967) *Wandering ratio* se define como la relación entre la longitud del drenaje principal y la longitud del valle. Este último es la distancia en línea recta entre la salida de la cuenca y el punto más alejado de esta.

10.3.1.3. Parámetros relacionados a la textura de la cuenca.

La textura del drenaje está relacionada con la superficie externa de la cuenca, esta depende fundamentalmente de la permeabilidad del suelo y el volumen de agua disponible para penetrarlo en un tiempo determinado, además de otros factores como el clima, el tipo de litología, estructuras geológicas presentes, factores biológicos y la topografía. Los factores previamente mencionados confluyen y crean así un conjunto de características que modifican el entorno hidrológico. (Worschitz, 2014)

Frecuencia de Drenaje (Fs). De acuerdo con Horton (1945) es el cociente entre la sumatoria total del número de drenajes y su área en km^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 60 se categoriza el Fs según el valor resultante (Somashekar, Ravikumar, Sowmya, Dar, y Ravikumar, 2011).

Tabla 60: Características de la cuenca de acuerdo con el valor Fs

Fs	Nº Drenajes / Km^2
Bajo	0 - 5
Moderado	5 - 10
Moderado - Alto	10 - 15
Alto	15 - 20
Muy Alto	20 - 25

Densidad de Drenaje (Dd). 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 61 describe las magnitudes dadas para los rangos de Dd.

De acuerdo con Ordóñez (2011) para valores de Densidad de Drenaje se tiene

Tabla 61: Características de la cuenca de acuerdo con el valor Dd

Dd	Descripción
1	Bajo
1,01 - 2	Moderado
2,01 - 3	Alto
> 3	Muy Alto

lo siguiente que valores de menor densidad de drenaje señalan materiales del terreno resistentes a la erosión y suelos muy permeables, y pendientes suaves. En tanto, valores de mayor densidad de drenaje significan mayor potencial de erosión, suelos impermeables y 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 (Fs) y la densidad de drenaje (Dd). 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 (Dd) y la frecuencia de Drenaje (Fs) (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 (N1) 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 (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 62 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 62: Características de la cuenca de acuerdo con el valor Lg

Lg	Descripción
< 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 63 representa los atributos dados para el número de robustez.

Tabla 63: 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 área 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 64 permite identificar el proceso hidrogeomorfológico asociado al índice de Melton.

Tabla 64: 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 km² 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 144).

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

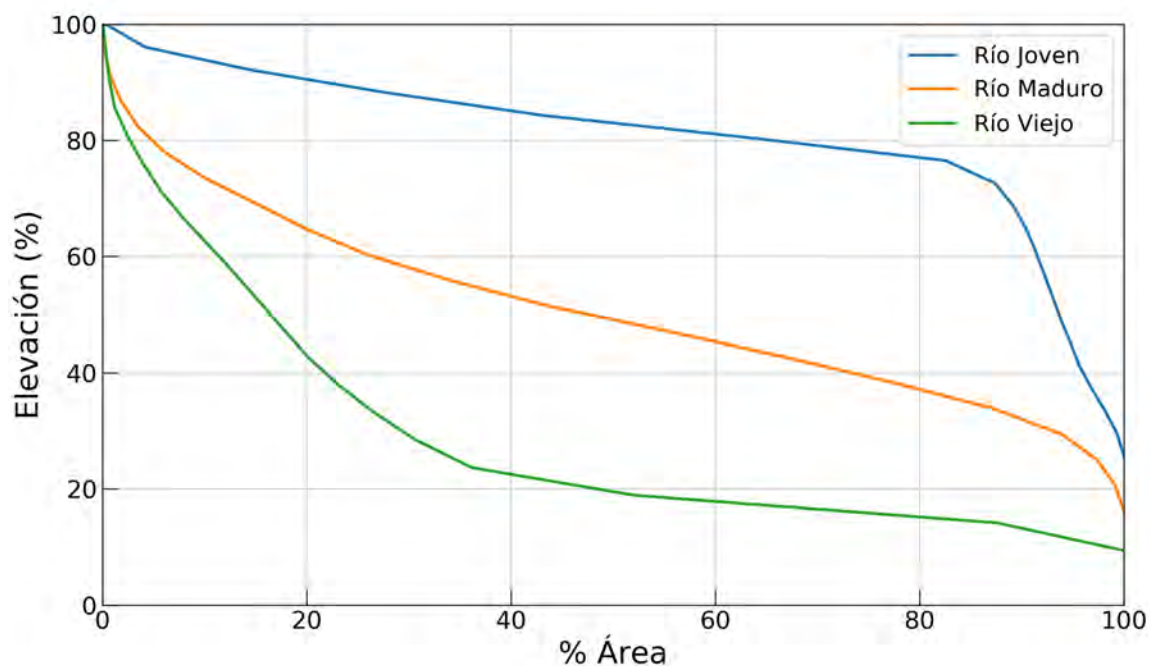


Figura 144: Cambio de forma de la curva hipsométrica con la edad del río. Fuente: Elaboración propia

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 65: 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	Coeficiente ρ (ρ)	$\rho = Lur / Rb$	Horton (1945)
Geometría y forma de Cuenca	8	Longitud de la cuenca (Lb)	Longitud en km	
	9	Área (A)	Área en km ²	
	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	Coeficiente 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	Coeficiente 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	Schumm (1956)
	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 66, se presentan los resultados de los índices morfométricos obtenidos, correspondientes al antiguo ETCR Llano Grande.

Las Figuras 145, 146, 147 y 148, presentan los resultados obtenidos para la curva hipsométrica, histograma altimétrico y perfil longitudinal respectivamente.

Tabla 66: Índices morfométricos para la evaluación de la torrencialidad de las cuencas del antiguo ETCR Llano Grande.

	Parámetro	Símbolo	Llanogrande	Chimiadó
Red de Drenaje	Orden cauce principal	Su	3	6
	Longitud cauce principal (km)	Cl	4,350	19,660
	Número de drenajes	Nu	105	1617
	Longitud de los drenajes (km)	Lu	20,441	312,425
	Relación de bifurcación	Rb	1,703	2,163
	Relación de longitud de los drenajes	Rl	2,013	2,223
	Coefficiente ρ	ρ	1,173	1,107
Geometría y forma de la cuenca	Longitud de la cuenca (km)	Lb	4,005	15,026
	Área (km ²)	A	3,733	76,000
	Perímetro (km)	P	12,952	56,210
	Factor forma	Ff	0,233	0,337
	Relación de elongación	Re	0,544	0,655
	Relación de circularidad	Rc	0,280	0,302
	Coefficiente de compacidad	Cc	1,904	1,832
	Relación de textura	Rt	4,246	14,677
	Relación de aptitud	Rf	0,336	0,350
	<i>Wandering ratio</i>	Rw	1,086	1,308
Textura de las Corrientes	Frecuencia de drenaje	Fs	28,125	21,276
	Densidad de drenaje	Dd	5,475	4,111
	Constante de mantenimiento del canal	C	0,183	0,243
	Intensidad de drenaje	Di	5,137	5,176
	Número de infiltración	If	153,996	87,463
	Coefficiente de torrencialidad	Ct	14,732	10,855
	Longitud del flujo superficial	Lg (km)	0,091	0,122
Características del Relieve	Relieve	H	1316	2599
	Pendiente media de la cuenca (°)	S	24,133	29,703
	Relación del relieve	Rh	0,329	0,173
	Número de robustez	Rn	7,206	10,684
	Índice de Melton	M	0,681	0,298

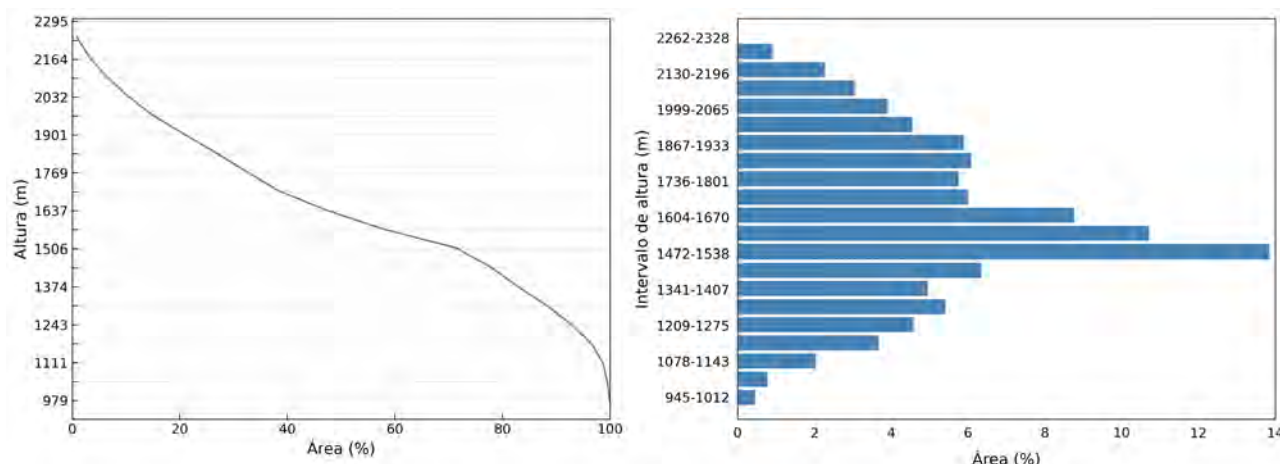


Figura 145: Curva hipsométrica e histograma altimétrico de la Q. Llanogrande.

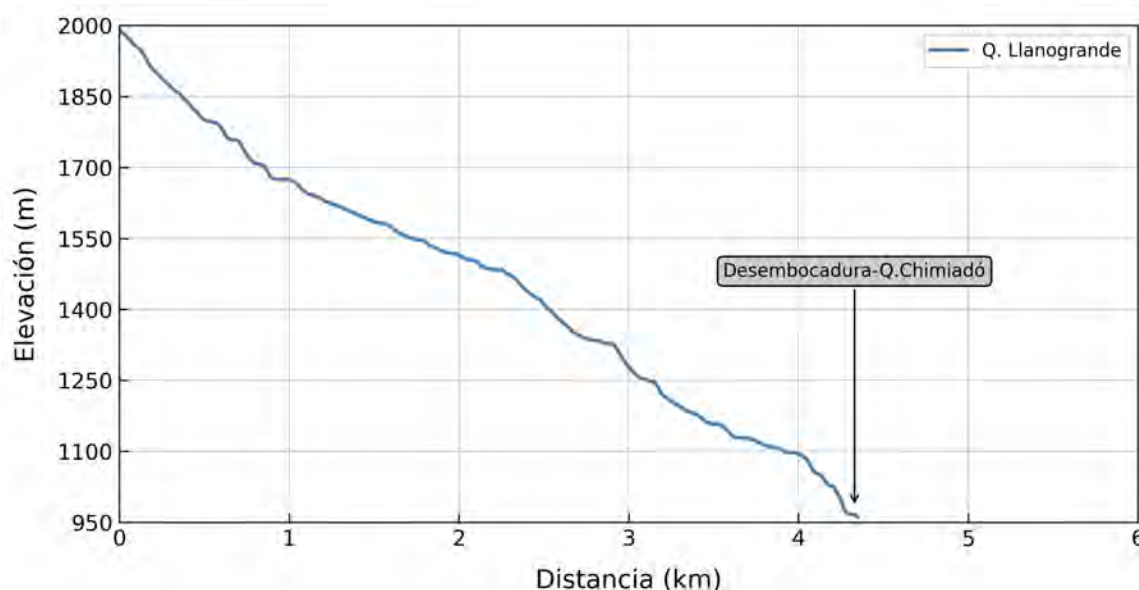


Figura 146: Perfil longitudinal de la Q. Llanogrande.

La cuenca de la quebrada Llanogrande en general presenta parámetros relacionados con la red de drenaje bajos, debido principalmente al limitado número de contribuyentes y sus cortas longitudes, apoyando los resultados que relacionan las diferencias longitudinales existentes, diferenciando el orden para cada drenaje. Es por esto que valores como el coeficiente ρ dan lugar a una interpretación que tiene más en cuenta la longitud de los canales de orden superior, lo cual atenúa los efectos erosivos a lo largo de las corrientes. Los valores de la relación de bifurcación y de longitud, permiten entender la cuenca como susceptible a presentar picos o crecidas importantes, lo cual se ve reflejado en una baja capacidad de almacenamiento hídrico y rápida evacuación. En lo que res-

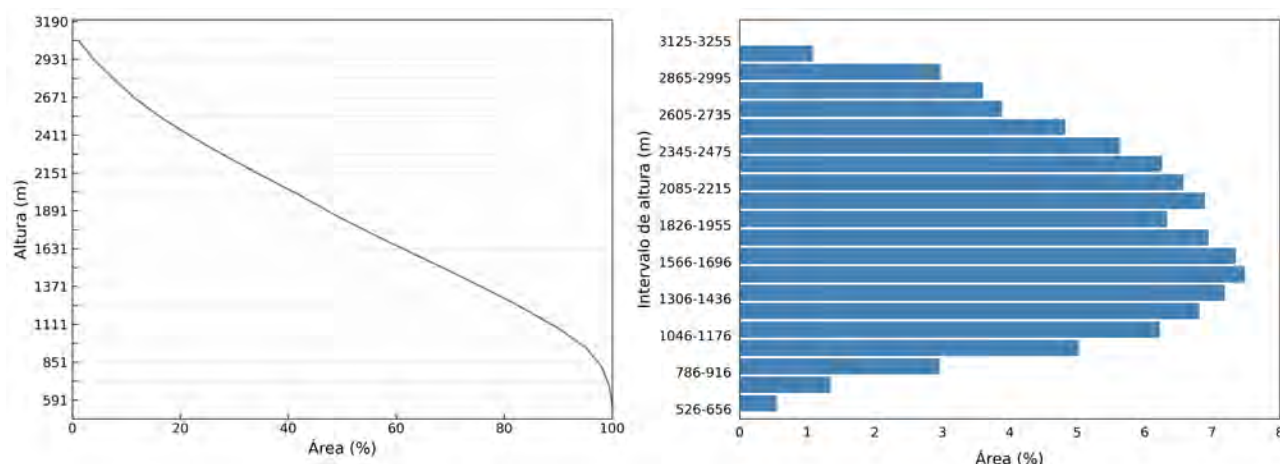


Figura 147: Curva hipsométrica e histograma altimétrico de la Q. Chimiadó.

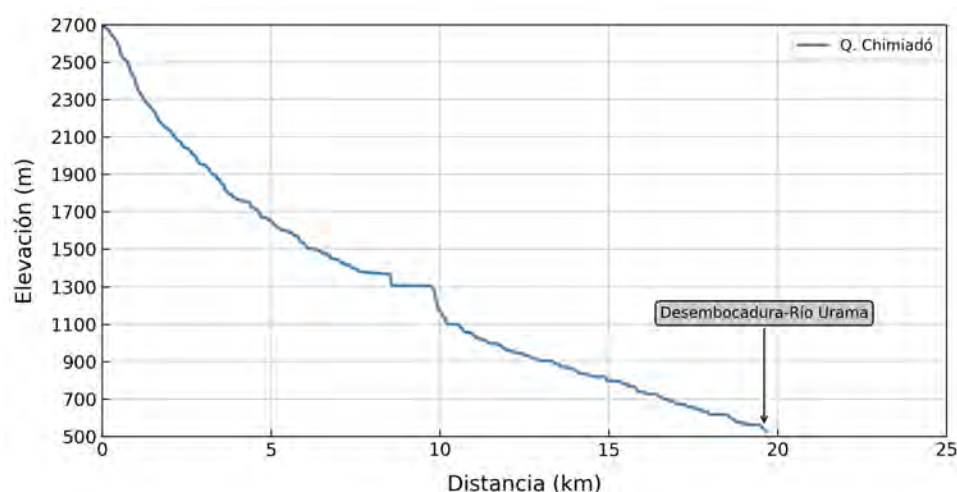


Figura 148: Perfil longitudinal de la Q. Chimiadó.

pecta a la forma de la cuenca, es muy notable la superioridad del perímetro y la longitud máxima respecto al área, lo que evidencia el corto tiempo en el que se pueden ver reflejados los procesos hídricos repentinos en toda la cuenca, sin embargo esto es discutible teniendo en cuenta el valor resultante para el factor forma, la relación de circularidad y el coeficiente de compacidad, ya que indican una cuenca alargada menos sujeta a las crecientes súbitas. Parámetros como la relación de elongación y de textura permiten entender que la cuenca está asociada a relieves pronunciados que representan en gran medida la influencia de los procesos endógenos y la poca capacidad de infiltración.

Los parámetros texturales de la cuenca de la quebrada Llanogrande representan la rápida organización y concentración de la esorrentía, de los cuales resaltan la elevada densidad de drenaje y baja constante de mantenimiento,

reflejo de suelos impermeables, pendientes abruptas y gran fortaleza de los procesos erosivos, adicional a la posible escasez de cobertura vegetal en la zona. Estos resultados van de la mano con el alto coeficiente de torrencialidad y baja longitud de flujo superficial, el cual sustenta la susceptibilidad a la erosión a lo largo del cauce principal. De igual forma de las características del relieve se obtienen resultados que fortalecen los obtenidos para las texturas de los drenajes, argumentando que el poder erosivo y la velocidad de escorrentía son muy altas, junto a una importante capacidad de transporte. Por último el número de robustez y el índice de Melton permiten concluir que existe una gran complejidad estructural en la zona, con relieves muy pronunciados, pendientes empinadas, altas densidades de drenaje y una muy alta susceptibilidad a presentar avenidas torrenciales del tipo flujo de escombros.

Para la cuenca de la quebrada Chimiadó se identifica una importante cantidad de corrientes con longitudes promedios, relaciones de bifurcación y de longitud que demuestran presencia de fuertes pendientes y rápida concentración de flujos superficiales. Sin embargo, por medio del coeficiente ρ se identifica una capacidad de almacenamiento que parece ser normal, con intensidades de crestas de inundación no muy relevantes. Parámetros de geometría y forma evidencian una cuenca ligeramente alargada, levemente sujeta a crecientes súbitas, con relieves moderadamente pronunciados y no muy altos tiempos de concentración. La elevada relación de textura da como resultado una importante dependencia de los factores litológicos y un aspecto del relieve que puede estar asociado en gran medida a pocas capacidades de infiltración.

Los resultados obtenidos para la frecuencia y densidad de drenaje de la cuenca Chimiadó reflejan un elevado grado de disección, rápida concentración y evacuación de la escorrentía, al igual que permite entender la poca resistencia que opone el suelo hacia los procesos erosivos y la baja permeabilidad, la cual puede estar asociada a una disminución en la vegetación y fuertes pendientes. Estas mismas conclusiones se pueden deducir de la constante de mantenimiento, en la que es posible evidenciar poca cantidad de área disponible para alimentar y abastecer el cauce principal. Igualmente la intensidad de drenaje da lugar a interpretaciones que suponen baja influencia de los agentes denudacionales y mayor incidencia de factores estructurales y propios de la actividad tectónica reciente regional. También es de resaltar que el número de infiltración no es tan alto, lo cual puede debatir la suposición de una baja permeabilidad y da lugar a un valor levemente mayor en lo que respecta a la infiltración general de la cuen-

ca y una disminución en la escorrentía. La erodabilidad lineal y la capacidad de descarga se ven influenciadas por la densa cantidad de corrientes de primer orden, razón por la cual el coeficiente de torrencialidad, a pesar de no ser tan alto, si evidencia una importante susceptibilidad a la erosión, principalmente sobre el canal principal, apoyada también en la longitud de flujo superficial, y una consideración de moderadamente alta torrencialidad. Respecto a los parámetros asociados al relieve, cabe resaltar que al tener un desnivel altitudinal tan alto, la variabilidad climática toma gran relevancia, pues esta influye directamente en las precipitaciones y temperaturas que se registran en toda la cuenca. De igual forma la pendiente media de la cuenca es alta, aumentando la velocidad de la escorrentía y la capacidad de transporte. Finalmente se identifica una complejidad estructural que predomina, influyendo en la pronunciación del relieve y valores para el índice de Melton que suponen una susceptibilidad a presentar eventos tipo inundación de escombros.

Mediante las curvas hipsométricas es posible describir que tanto para la cuenca de Llanogrande como para la cuenca Chimiadó, se tienen curvas que hacen referencia a rios juvenes, con la cuenca de la quebrada Chimiadó como la mas madura. Esto también se observa en los perfiles longitudinales e histogramas altimétricos, en los cuales es posible identificar las pendientes empinadas que favorecen la velocidad de transporte en las cuencas, con predominancia de altitudes de entre 1400 y 1600 msnm.

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 ρ 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 suscepti-

bilidad 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 alrededor 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 149 contiene los resultados obtenidos según los umbrales de Wilford y cols. (2004) para las cuencas del antiguo ETCR Llano Grande. A continuación se describen los datos utilizados para dichos umbrales y los resultados obtenidos:

- Longitud máxima de la cuenca de la quebrada Llanogrande es de 4 km. Esta

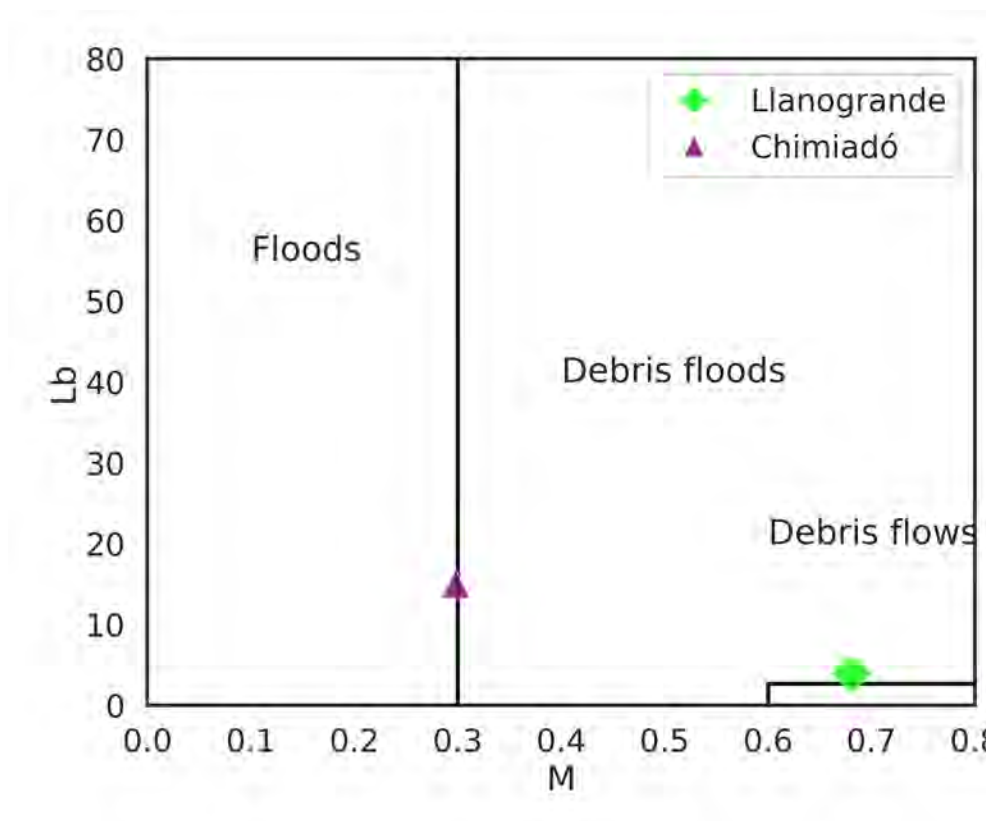


Figura 149: Umbrales de Wilford y cols. (2004) aplicados para el antiguo ETCR Llano Grande.

medida representa la corta distancia que debe atravesar el fluido desde el punto más lejano hasta la desembocadura de la quebrada.

- El índice de Melton en la cuenca de la quebrada Llanogrande es de 0,68 lo cual la ubica en una zona donde predomina la presencia de sedimentos transportados a gran velocidad y la aleja totalmente de una posible inundación.
- Con base en los valores obtenidos para Lb y M, se observa que la quebrada Llanogrande se encuentra en el límite entre el flujo de escombros y la inundación de escombros. Sin embargo, los elevados valores de M permiten entender la cuenca como de carácter muy torrencial y un poco más relacionada con el flujo de escombros.
- Para la cuenca de Chimiadó, se obtuvieron valores de 15,02 km de Lb, ubicándola como una cuenca de mayores extensiones.
- El índice de Melton en Chimiadó apenas llega a 0,3 por lo cual se puede descartar un posible flujo de escombros basándose únicamente en los

umbrales.

- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, la cuenca Chimiadó se encuentra en el límite entre la inundación y la inundación de escombros. Sin embargo, análisis utilizando mayor cantidad de índices morfométricos y recolectando información de estudios previos, ubican a la quebrada Chimiadó como torrencial.
- Los umbrales de Wilford y cols. (2004) no representan correctamente las características torrenciales para las cuencas del antiguo ETCR Llano Grande. Esta conclusión se soporta en el hecho de que las cuencas presentan valores de M mucho más amplios y variados, dando lugar a cuencas consideradas no torrenciales, que pueden tener índices de Melton superiores a 0,3. Adicionalmente estos umbrales ignoran parámetros importantes de textura y relieve que permiten identificar las cuencas con mayor exactitud, y que influyen directamente en la capacidad y velocidad de transporte de sedimentos.

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

- Para la cuenca de la quebrada Llanogrande la relación de relieve es de 0,33 lo que la ubica en una zona muy superior a los resultados obtenidos para el estudio realizado por Arango y cols. (2020).
- El área de la cuenca Llanogrande es de tan solo 3,73 km². Con un orden de Strahler de 3 e índice de Melton de 0,68.
- Los resultados para la cuenca Llanogrande para M y R_h son muy superiores a los obtenidos para las cuencas torrenciales y no torrenciales, adi-

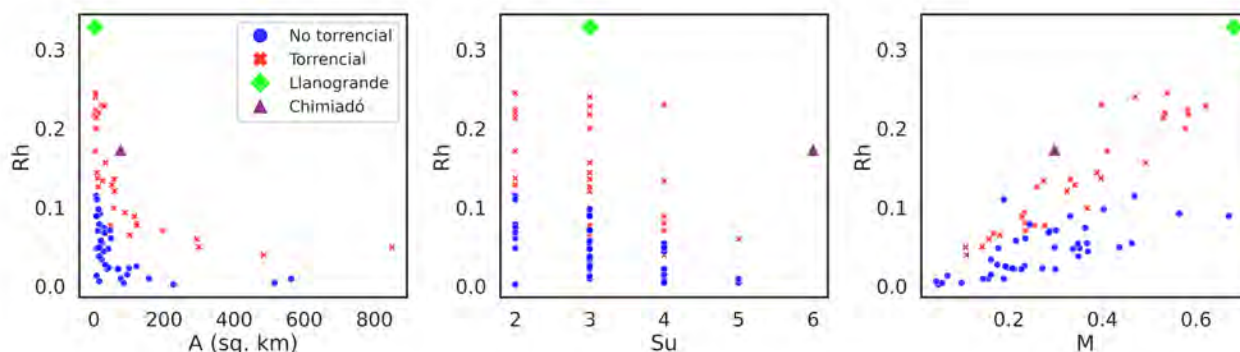


Figura 150: Comparación de variables con Rh para el antiguo ETCR Llano Grande.

cionalmente el área concuerda con el predominio existente en las cuencas torrenciales para cuencas pequeñas que no superan los 100 km².

- Si se agrupan las cuencas torrenciales y no torrenciales por separado, es posible concluir que la cuenca de la quebrada Llanogrande se encuentra ubicada en el grupo de las torrenciales, además de ser la que más exagera los valores que permiten dicha agrupación, es decir, lleva al límite valores muy representativos como lo son el Rh y el M, sumados a un área muy pequeña, caracterizándola como una cuenca hiper-torrencial.
- Para la cuenca de la quebrada Chimiadó se tiene un Rh de 0,18 que puede considerarse alto, pero coherente con los resultados obtenidos para las cuencas torrenciales.
- En Chimiadó el área es de 76 km² y el índice de Melton de 0,3.
- La quebrada Chimiadó a pesar de tener un área relativamente pequeña y coherente con el grupo de cuencas torrenciales, el orden se sale de la media y da lugar a un único punto que presenta Rh alto y orden strahler de 6.
- Los resultados obtenidos para Chimiadó la ubican en el grupo de cuencas torrenciales, con un único valor diferenciable respecto al orden de Strahler. Sin embargo la formación de drenajes que aumentan este orden depende también de factores importantes no considerados en estos gráficos, como la infiltración y la frecuencia de drenaje, los cuales explicarían el orden resultante sin necesidad de extraer la cuenca del grupo torrencial.

En general las cuencas del antiguo ETCR Llano Grande son de carácter torrencial y pueden presentar fuertes flujos de escombros debido principalmente

a sus altas pendientes y textura del drenaje.

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 151, 152 y 153 se presentan la amenaza por movimientos en masa superficiales según las condiciones de estabilidad para cada escenario de lluvia.

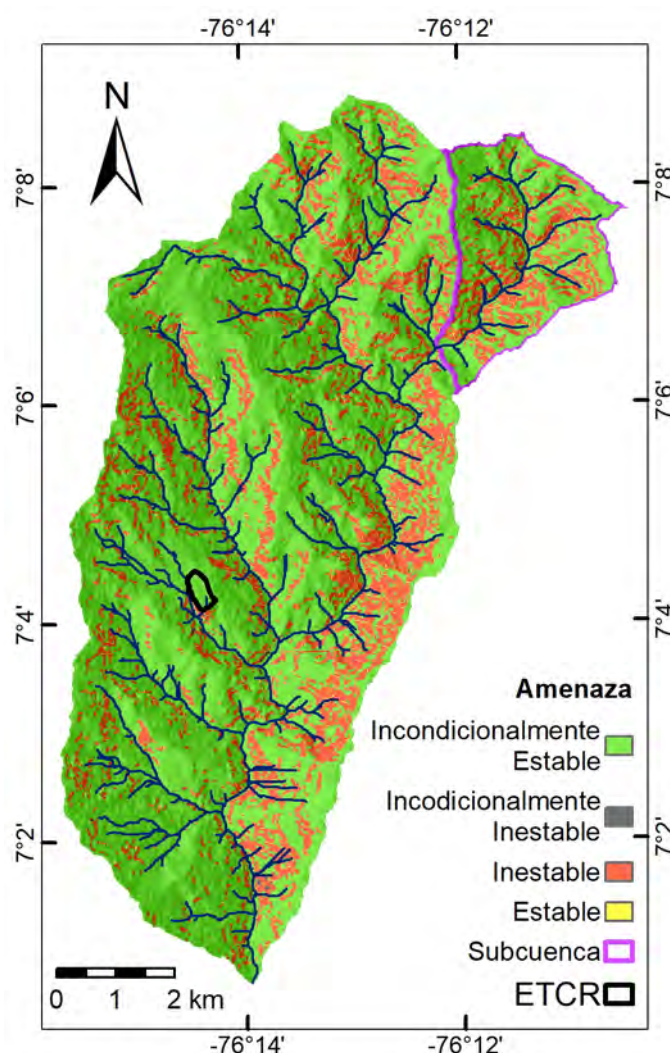


Figura 151: Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 10 años.

A partir de los resultados para las distintas intensidades de lluvia se observa

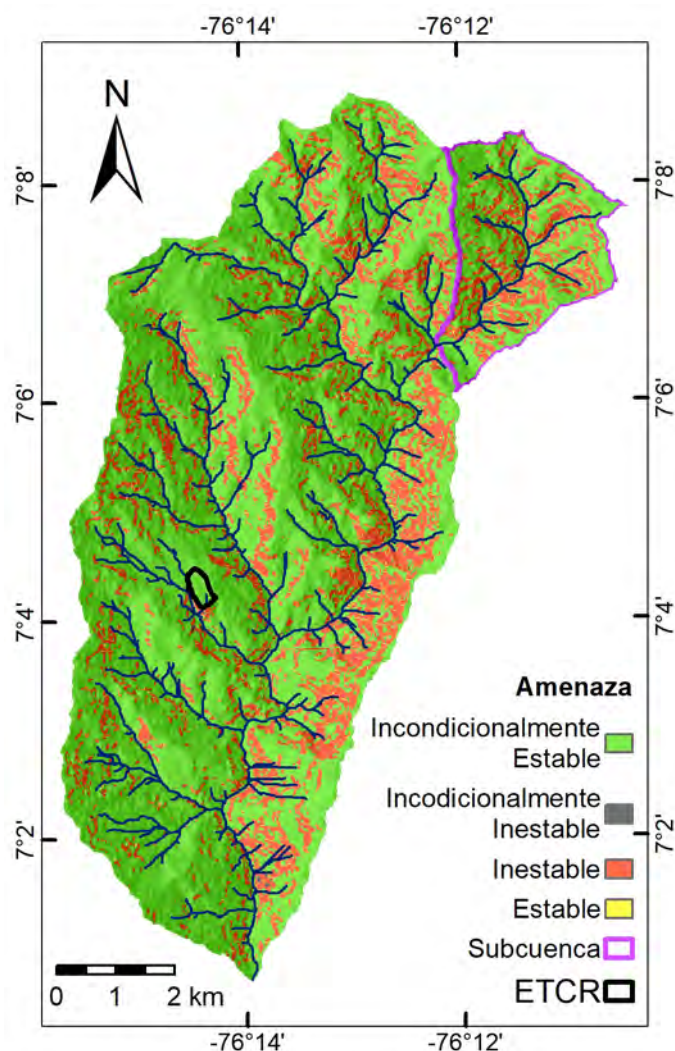


Figura 152: Susceptibilidad por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 100 años.

que las zonas inestables e incondicionalmente inestables se concentran en el costado norte y este de la cuenca, estas celdas 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 49. Este volumen se calcula para la subcuenca presentada en las Figuras 151 a 153 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.

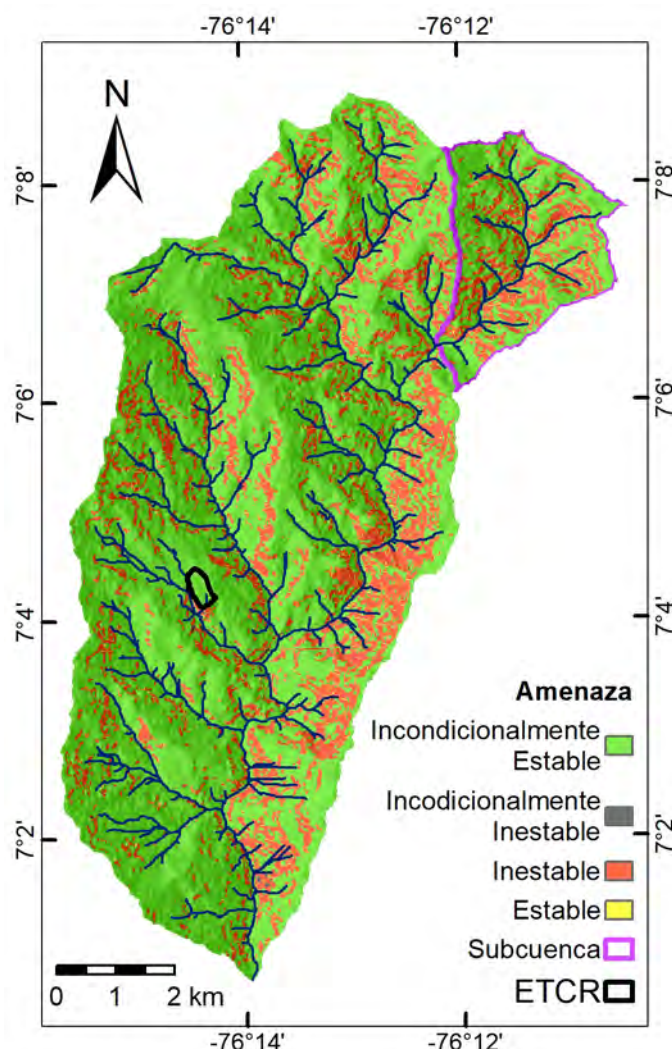


Figura 153: Amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia correspondiente al periodo de retorno de 500 años.

10.4. Zonificación de manchas de avenidas torrenciales a escala de cuenca

El término avenida torrencial se refiere a la llegada de un caudal desde aguas arriba. Las avenidas se distinguen de las crecidas ya que en estas últimas el aumento del caudal se da en dirección vertical, desde los pies del espectador hacia su cabeza, mientras que la avenida llega desde aguas arriba hasta la posición de este, y en que el aumento de caudal de una avenida se presenta de forma súbita e impetuosa. (Borga y cols., 2014; Díez Herrero, 2008). Por lo que es necesario, cuando se tienen cuencas hidrográficas con las características de alta pendiente, corto tiempo de respuesta ante fuertes lluvias y alto suministro

de sedimentos y detritos, tener en cuenta el caudal de sedimentos (Takahashi, 2007).

Se realiza el procedimiento de estimación de manchas de avenidas torrenciales siguiendo la metodología descrita con el descriptor morfométrico HAND y la curva de calibración. La estimación de sólidos totales se realiza a partir de los resultados obtenidos previamente. A continuación, en la Tabla 67 se presentan los volúmenes de material sólido y líquido asociados a cada período de retorno.

Tabla 67: Cálculo de caudal total para avenidas torrenciales

Cuenca Chimiadó			
Tr (años)	10	100	500
Volumen sólido (m ³)	5988542,8	5989342,8	5990552,0
Caudal líquido (m ³ /s)	278,9	499,7	658,2
Tc (min)	210		
Volumen Líquido (m ³)	3514140,0	6296220,0	8293845,9
Volumen Total (m ³)	9502682,8	12285562,8	14284397,9
% Líquido	37,0	51,2	58,1
% Sólido	63,0	48,8	41,9
Caudal total (m ³ /s)	754,2	975,0	1133,7

La zonificación de amenaza por avenida torrencial se define a partir de los períodos de retorno de 10 años (amenaza alta), 100 años (amenaza media) y 500 años (amenaza baja). Los resultados de la zonificación por avenida torrencial se presenta a continuación en la Figura 154 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.

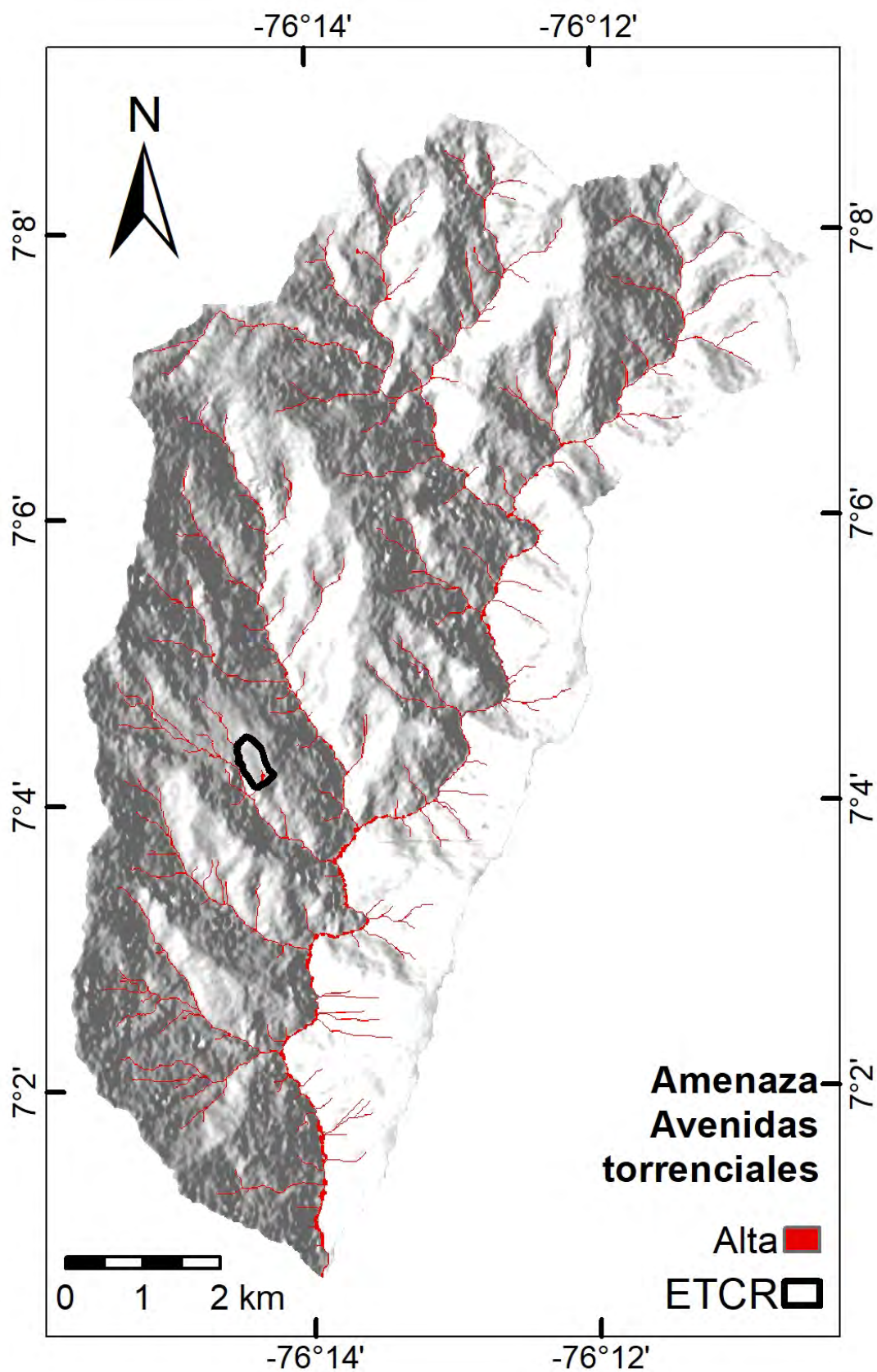


Figura 154: Zonificación de amenaza por avenidas torrenciales

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 montanas y metamorfosis fluvial (Tucumán-Argentina). *Revista de la Asociacion Geologica Argentina*, 71(1).
- Caballero Acosta, H., Mejía Peláez, I., y (SGC), S. G. C. (1992). *Investigación histórica y de campo del derrumbe el revenidero ocurrido en octubre de 1970, municipio de uramita* : Medellín, Colombia: Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS) 2004-2011,. Descargado de <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=Investigaci%C3%B3n%20hist%C3%B3rica%20y%20de%20campo%20del%20derrumbe%20el%20revenidero%20ocurrido%20en%20octubre%20de%201970>
- 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 doi: 10.1007/3-540-31060-6_8
- Corpoamazonía. (2018). Actualización POMCA del río Hacha: Informe final fase de diagnóstico. , 250.
- Corpourabá. (2010). *Zonificación de amenazas y riesgos de origen natural y antrópico del área urbana del municipio de dabeiba como herramienta fundamental en la planificación del territorio* (Inf. Téc.).
- Corpourabá. (2019). *POMCA Rio Sucio Alto* (Inf. Téc.).
- Díaz & López. (1987). MORFOMETRIA DE REDES FLUVIALES: REVISION CRITICA DE LOS PARAMETROS MAS UTILIZADOS Y APLICACION AL ALTO GUADALQUIVIR. *urls and Queries*, s3-V(126), 47–62. doi: 10.1093/nq/s3-V.126.435-a
- Díez Herrero, A. (2008). Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración. *Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España*, 1, 190.
- Duvall, A., Kirby, E., y Burbank, D. (2004). Tectonic and lithologic controls on bedrock channel profiles and processes in coastal California. *Journal of Geophysical Research*, 109(F3), 1–18. doi: 10.1029/2003jf000086
- Faniran, A. (1968). The index of drainage intensity—a provisional new drainage factor. *Australian*

- journal of science*, 31, 328–330.
- Ferrando, F. J. (2015). Métodos hidromorfométricos para de terminar la erosividad en cuencas hidrográficas. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(3), 5–14.
- Gil, V. (2009). *Hidrogeomorfología de la cuenca alta del río Sauce Grande aplicada al análisis de crecida*.
- Horton, R. E. (1945). Erosion development in stream and their drainage basins. *Geological Society Of America Bulletin*, 56(1), 275–370. doi: 10.1130/0016-7606(1945)56
- Huanca, A. C. (1999). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río lucre. *Espacio y Desarrollo*(11), 125–145.
- Ibáñez, S., Moreno, H., y Gisbert, J. (2010). Morfología de las cuencas hidrográficas. *Universidad Politécnica de Valencia*, 12.
- Mantilla, R., Mesa, O., y Poveda, G. (1998). Geometría, topología y morfometría de las cuencas magdalena-cauca y atrato a partir de modelos digitales de terreno. *XIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Cali*, 155–172.
- Melton, M. A. (1957). *An Analysis of the Relations Among Elements of Climate, Surface Properties, and Geomorphology*. (C. U. Department of Geology, Ed.).
- Miller, V. (1953). A quantitative geomorphologic study of drainage basin characteristics in the clinch mountain area. *Technical Report*, 3, 271–300.
- Ordóñez, J. (2011). ¿ Qué Es Cuenca Hidrológica ? *Sociedad Geológica de Lima*, 1, 1 – 44. Descargado de <http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm{ }Files/Publicaciones/Varios/Cuenca{ }hidrologica.pdf>
- Prabhakaran, A., y Jawahar Raj, N. (2018). Drainage morphometric analysis for assessing form and processes of the watersheds of Pachamalai hills and its adjoining, Central Tamil Nadu, India. *Applied Water Science*, 8(1), 1–19. Descargado de <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0646-5> doi: 10.1007/s13201-018-0646-5
- Sakthivel, R., Jawahar Raj, N., Sivasankar, V., Akhila, P., y Omine, K. (2019). Geo-spatial technique-based approach on drainage morphometric analysis at Kalrayan Hills, Tamil Nadu, India. *Applied Water Science*, 9(1), 1–18. Descargado de <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0899-7> doi: 10.1007/s13201-019-0899-7
- Schumm, S. A. (1956). EVOLUTION OF DRAINAGE SYSTEMS AND SLOPES IN BADLANDS AT PERTH AMBOY, NEW JERSEY. *BULLETIN OF THE GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA*., 67(1), 56.
- Senciales González, J. M. (1999). *Redes fluviales: metodología de análisis* (Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico de la Universidad de Málaga, Ed.).
- SGC. (2013). *Geología de la Plancha 114 Dabeiba* (Inf. Téc.).
- 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=b693dcd2a20f914ca7c4fa1e9eceebe>
- 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 píxeles correspondientes a las construcciones o urbanos y se corroboraron las zonas que según la interpretación visual correspondían a zonas con posibilidades de estar habitadas.

Según la Figura 155, para el antiguo ETCR Llano Grande, 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 Llano Grande proporcionando un mejor acercamiento en lo que compete a la ocupación del territorio (Figura 156).

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 campo y las imágenes satelitales 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 157.

El predio en su totalidad, a excepción de la infraestructura presente, se encuentra en condición de amenaza por movimientos en masa. Adicional, en condición de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales se encuentran pequeñas franjas alargadas en el noroccidente y sur del predio.

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

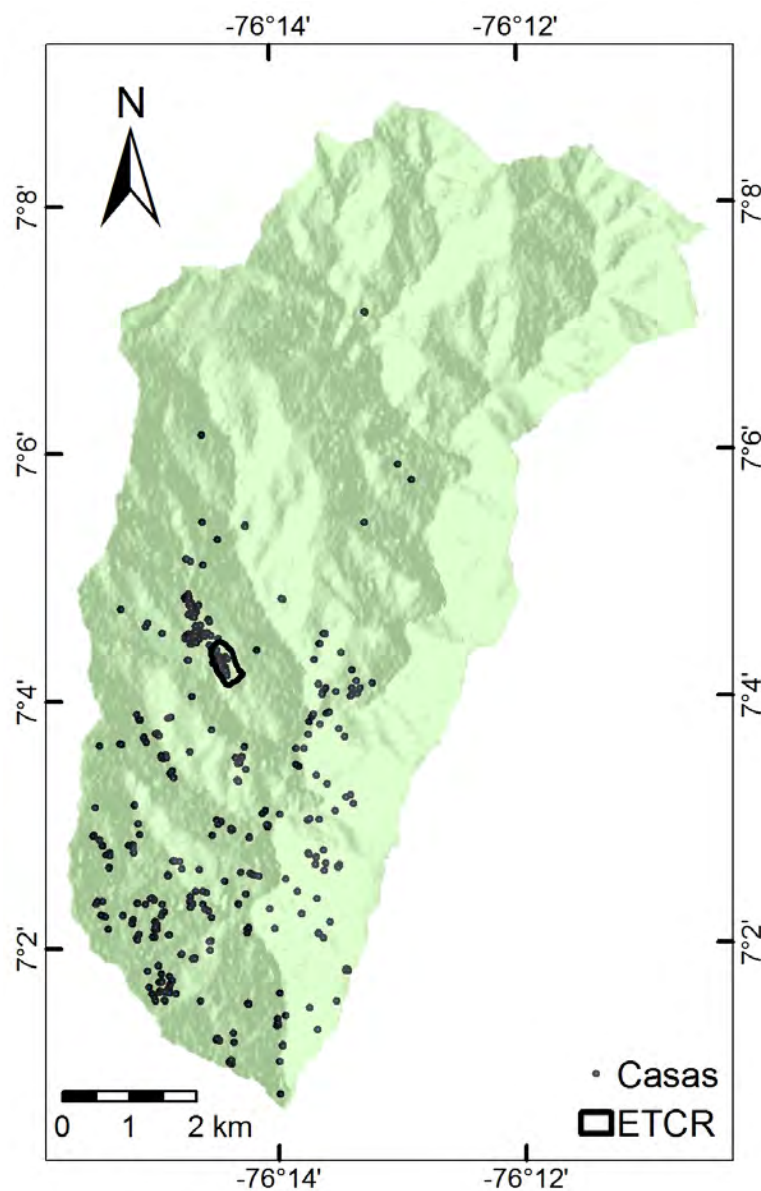


Figura 155: Ocupación territorial

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 campo y las imágenes satélites actualizadas.

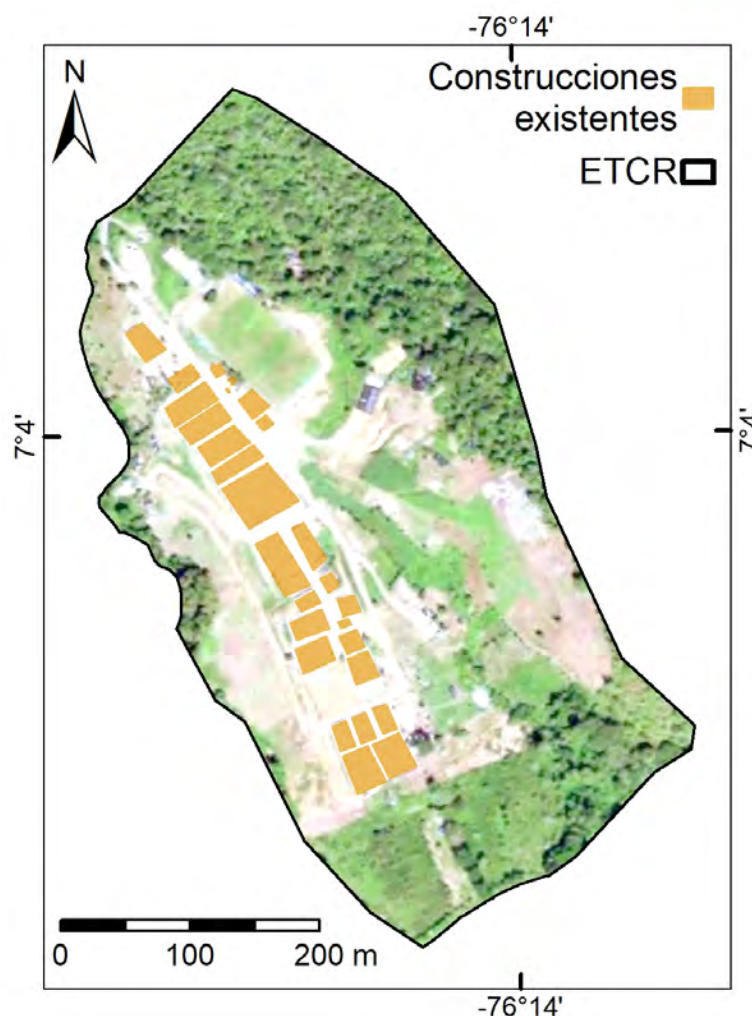


Figura 156: Levantamiento Construcciones

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 158, en el cual se resalta que la amenaza alta toque de manera parcial algún tipo de infraestructura se propende por el escenario mas crítico, 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 por movimientos en masa se encuentra la infraestruc-

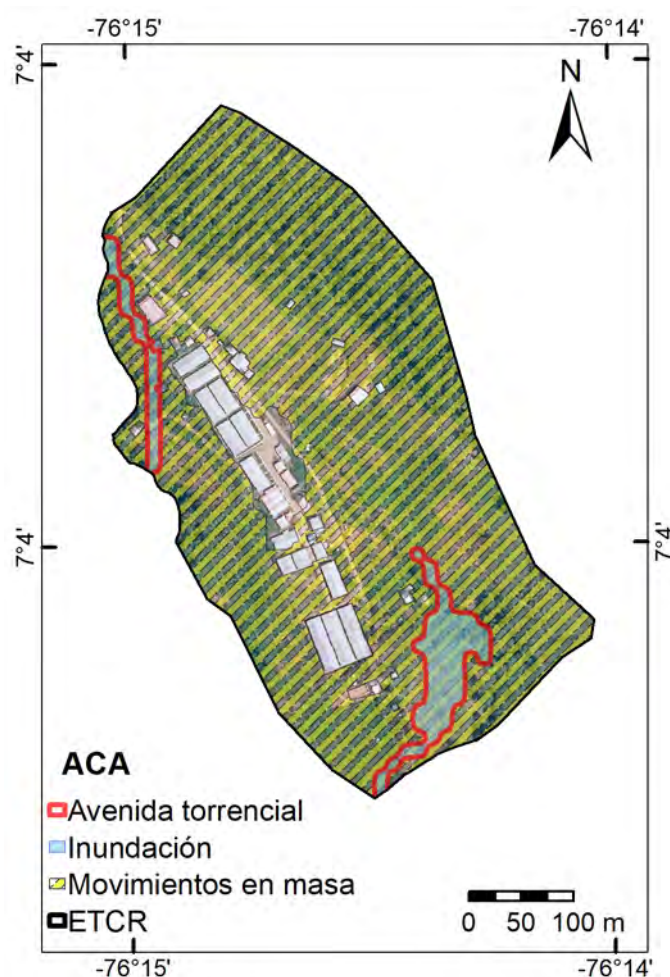


Figura 157: Zonas en condición de amenaza para el predio del antiguo ETCR.

tura del predio y, adicionalmente, una construcción del extremo norte del predio presenta condición de riesgo por inundaciones y avenidas torrenciales.

11.2. Medidas no estructurales

Finalmente, se presentan una serie de medidas generales que se pueden implementar en las zonas caracterizadas como amenaza alta en cada zona:

- Es recomendable la incorporación de estos estudios al ordenamiento territorial y de normas urbanísticas a que haya lugar por parte del ente municipal.
- Se debe definir medidas de manejo especial para las zonas de amenaza alta y mediante el desarrollo de usos agroforestales, la implementación de prácticas culturales de conservación, manejo de cultivos y manejo de escorrentías.

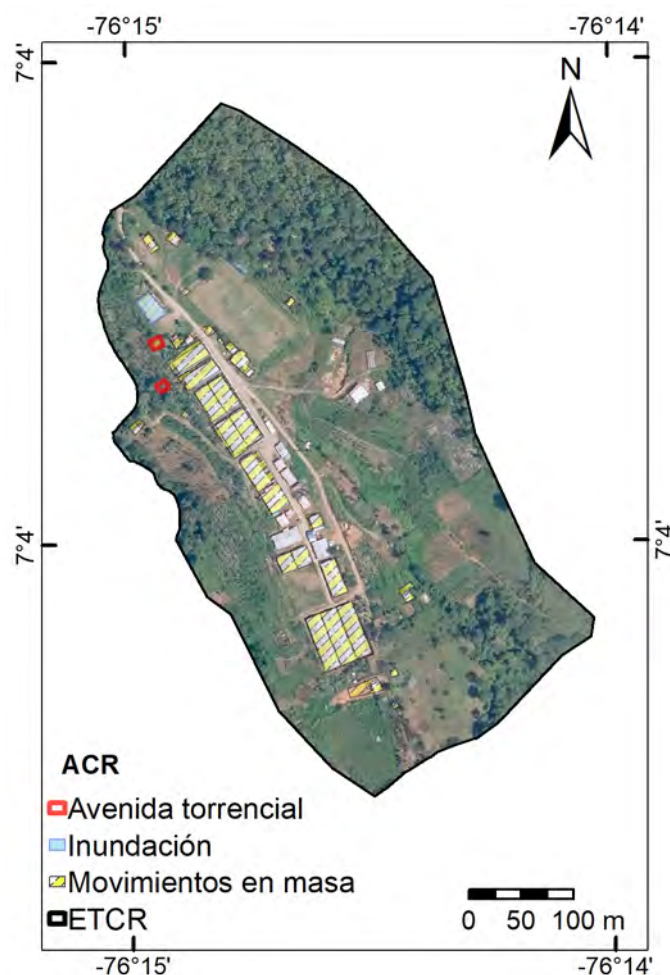


Figura 158: Zonas en condición de riesgo para el predio del antiguo ETCR.

- Implementar planes de manejo de cauces en las quebradas aledañas y de abastecimiento del antiguo ETCR.
- Se recomienda asistencia técnica y mejoramiento de prácticas agrícolas en zonas de ladera y reforestación de las laderas de montaña.
- Vigilancia y control normativo por parte de las autoridades frente a acciones de tala y quemas.
- Capacitación a la comunidad en normativa ambiental y cuidado de los terrenos y el recurso hídrico
- Prácticas agrícolas que controlen la erosión y sedimentación
- Se recomienda la instalación de un sistema de alerta temprana en las corrientes susceptibles de generar este fenómeno amenazante.

- Se propone socializaciones y capacitaciones a la comunidad sobre la importancia de la gestión del riesgo, en especial el dar a conocer las zonas demarcadas con condición de amenaza y los respectivos retiro.

11.2.1. Recomendaciones específicas

1. Se recomienda sensibilizar a la comunidad cercana al antiguo ETCR sobre la importancia de la gestión del riesgo y dar a conocer las zonificaciones de amenaza ya que se están construyendo viviendas sin ningún tipo de planificación previa.
2. En la zona SW colindante del antiguo ETCR que conforman las laderas cercanas a la quebrada Llano Grande se evidencian procesos morfodinámicos de gran envergadura, entre las medidas se recomienda realizar coberturas de especies arbóreas que mitiguen la expansión retrogresiva del movimiento en masa rotacional evidenciado en la zona, el cual puede afectar la vía veredal de la zona de estudio

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 159, 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 árboles, 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

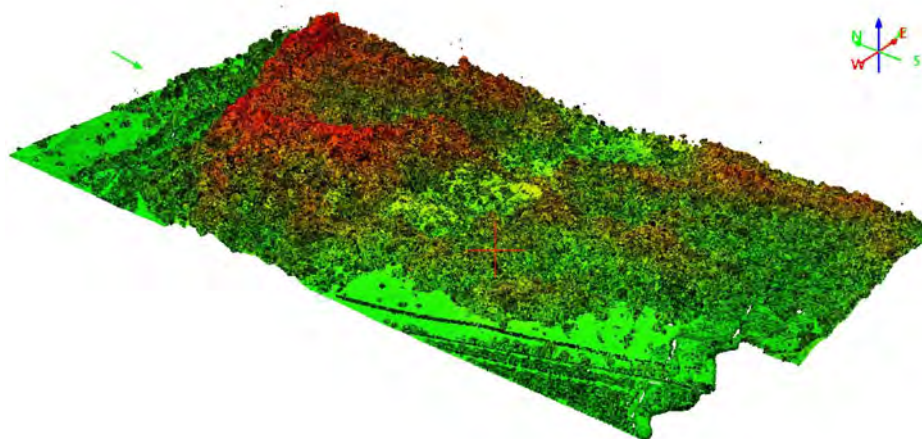


Figura 159: Resultado del trabajo realizado con LIDAR, Elaborado con el software *Quick Terrain Reader*

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: **05234003 IGAC**

Los resultados para el antiguo ETCR Llano Grande se observan en la Figura 160 y en la Figura 161.

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 160: Ortofotografía del antiguo ETCR Llano Grande

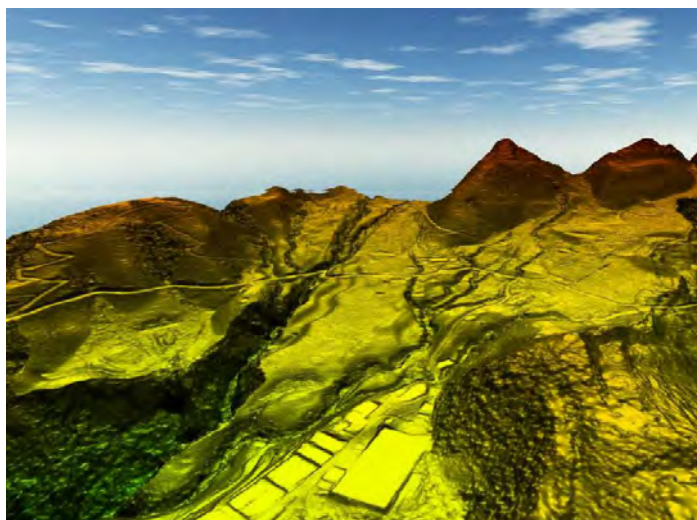


Figura 161: Modelo digital de terreno(DTM) del antiguo ETCR Llano Grande

La construcción del mapa geomorfológico para el antiguo ETCR Llano Grande se hace, con base en la observación del paisaje realizada durante las dos campañas de campo, con apoyo adicional del MDT. Para esto se llevó a cabo la delimitación de las áreas de terreno que presentan formas y características homogéneas (ver formato del anexo A-5 del S. G. SGC (2015) el cual se basa

en la metodología propuesta por Carvajal (2012)).

Los ambientes geomorfológicos presentes en el área de estudio, son los ambientes fluvial, antrópico y estructural-denudacional. Para codificar cada componente geomorfológica se utilizaron atributos como la inclinación de la ladera, la longitud, la forma y la rugosidad (ver Figura 162).

AMBIENTE ESTRUCTURAL - DENUDACIONAL				
Módulo 1	Módulo 2	Módulo 3	Módulo 4	Módulo 5
	Inclinación	Longitud	Forma	Rugosidad
[L] Ladera	[p] Plana a suave (<3°) [s] Suave (3-10°) [m] Moderada (11-20°) [a] Abrupta (20-45°) [e] Escarpada (>45°)	[m] Muy corta (<50m) [c] Corta (50-250m) [M] Mediana (250-500m) [l] Larga (500-1000m)	[r] Rectilínea [c] Cóncava [x] Convexa [i] Irregular	[l] Liso [r] Rugoso
Tipo de relieve	Índice relieve	Forma cresta		
[C] Colina (200-400m) [Lo] Loma (50-200m) [Mo] Montículo (<50m)	[m] Muy bajo (<50m) [b] Bajo (50-250m) [M] Moderado (250-500m) [a] Alto (500-1000m)	[a] Aguda [r] Redondeada [xa] Convexa amplia [xp] Convexa plana [p] Plana [pd] Plana disectada		
AMBIENTE FLUVIAL				
[Pa] Plano anegadizo				
AMBIENTE ANTRÓPICO				
[Sep] Superficie de explanación [Llant] Lleno antrópico				

Figura 162: Esquema de caracterización y nomenclatura de componentes geomorfológicas

El mapa geomorfológico resultante se muestra en la Figura 163. Allí se delimitan 12 componentes geomorfológicas (ver Tabla 68), donde la ladera abrupta corta rectilínea lisa (Lacrl) junto con la superficie de explanación (Sep) ocupan el 50 % del área del predio. Las componentes geomorfológicas delimitadas como laderas ocupan el 57 % del área, predominando el tipo de inclinación abrupta (35 % del área), la longitud corta (44 % del área), la forma rectilínea (44 % del área) y la rugosidad lisa (54 % del área).

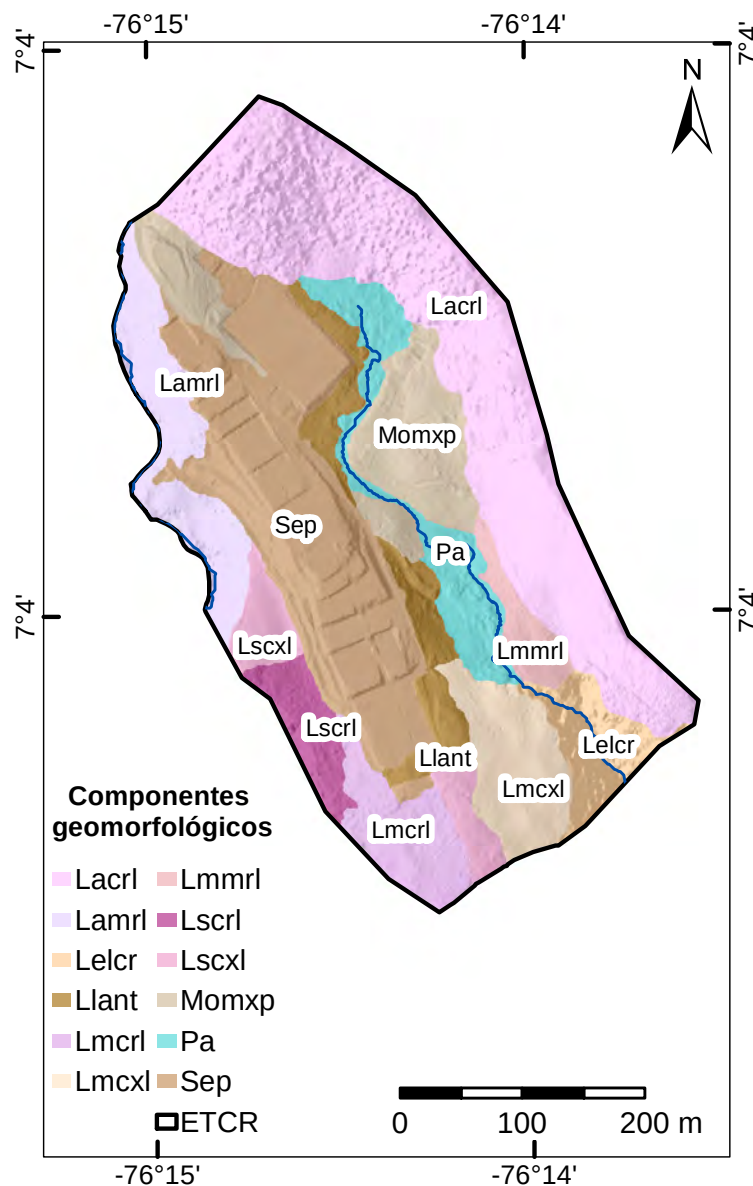


Figura 163: Mapa geomorfológico de detalle del antiguo ETCR Llano Grande.

El área donde actualmente se encuentra asentada la comunidad y alrededores, corresponde a un entorno depósitos de vertiente de gran magnitud provenientes desde la parte alta de la ladera, con presencia de drenajes con elevada energía de incisión (por ejemplo la quebrada Llanogrande), lo cual genera cañones profundos de laderas verticales a sub-verticales.

La componente Lacrl ocupa el 28 % del área del polígono del antiguo ETCR Llano Grande, marcando el límite este del predio, cubierta por bosque hacia el norte (ver Figura 164, Figura 165 y Figura 166). La superficie de explanación (Sep) ocupa el 22 % del área y se define como planos de allanamiento hecho en

Tabla 68: Leyenda del mapa geomorfológico de detalle del antiguo ETCR Llano Grande.

Color	Sigla	Nombre	Área(%)
	Lacr1	Ladera abrupta corta rectilínea lisa	28,0
	Lamrl	Ladera abrupta muy corta rectilínea lisa	7,1
	Lelcr	Ladera escarpada larga cóncava rugosa	3,8
	Llant	Lleno antrópico	5,0
	Lmcrl	Ladera moderada corta rectilínea lisa	4,6
	Lmcxl	Ladera moderada corta convexa lisa	5,7
	Lmmrl	Ladera moderada muy corta rectilínea lisa	2,1
	Lscl	Ladera suave corta rectilínea lisa	2,8
	Lscxl	Ladera suave corta convexa lisa	3,4
	Momxp	Montículo muy bajo convexo plano	9,4
	Pa	Plano anegadizo	6,1
	Sep	Superficie de explanación	22,0

laderas de sustrato rocoso y/o materiales no consolidados con el fin de adecuar el terreno para la construcción o para fines de estabilización de laderas, mediante la explanación o terraceos que disminuyen la pendiente del terreno (SGC, 2012). Se extiende en dirección NW y es el lugar donde se encuentra los módulos de vivienda (ver Figura 164 y Figura 166).

El plano anegadizo (Pa) corresponde, según la definición del SGC (2012), a una superficie casi plana e irregular con pendiente suave, localizado en áreas planas mal drenadas. En la zona se asocia a un pequeño drenaje, cuyo nacimiento se encuentra dentro del polígono, lo recorre en sentido NW-SE y sobre su pendiente plana y terreno húmedo se desarrollan pequeños cultivos. Hacia el sur del polígono el cauce tiene un cambio súbito de pendiente, con cambios de plano a inclinación escarpada en menos de 10m, generando un frente de erosión con gradiente de energía muy alto (ver Figura 164 y Figura 165).

El lleno antrópico corresponde, según la definición del SGC (2012), a planos hechos artificialmente con material de relleno para acondicionar terrenos para la construcción de viviendas, comúnmente de escombros y desechos de construcción. En la zona el material es producto del proceso de explanación y se encuentra depositado sobre la el costado derecho de la componente superficies de explanación (Sep), con presencia de bloques de tamaños métricos.

Los montículos muy bajos de cimas convexas planas, se identifican hacia el centro y este del polígono, vistas como formas segmentadas, con alturas relativas entre 5m y 10m y sobre las cuales hay presencia de algún tipo de infraestructura (ver Figura 164 y Figura 166).

Otros componentes identificados son: laderas moderadas cortas a muy cor-

tas, rectilíneas a convexas, lisas (Lmcxl) (Lmcrl) (Lmmrl); laderas abruptas muy cortas rectilíneas lisas (Lamrl) (ver Figura 167a) ; laderas suaves cortas convexas a rectilíneas lisas (Lscxl) (Lscrl) (ver Figura 167b); ladera escarpada larga cóncava rectilínea (Lelcr) la cual continúa por fuera el predio y hace parte del frente de erosión mencionado previamente.



Figura 164: Vista de componentes geomorfológicas en el antiguo ETCR Llano grande: Superficie de explanación (Sep), plano anegadizo (Pa), montículo muy bajo con cima convexa plana (Momxp), ladera abrupta corta rectilínea lisa (Lacrl)

12.3. Procesos morfodinámicos

Durante la visita de campo al antiguo ETCR Llano grande se identificaron procesos morfodinámicos clasificados como movimientos en masa activos e inactivos, erosión laminar, y surcos (ver Figura 168). Los movimientos en masa se presentan sobre la ladera oeste y sur del polígono, así como en una pequeña ladera cerca a la cancha de fútbol. Aunque la ladera oeste cuenta con vegetación significativa, las pendientes abruptas y escarpadas, colindantes con la quebrada, aumentan la inestabilidad del material (ver Figura 169).

Hacia la esquina NW de la cancha de fútbol, se observan algunas áreas inestables que pueden seguir desarrollándose (ver Figura 170a).



Figura 165: Vista de componentes geomorfológicas en el antiguo ETCR Llano Grande: Plano anegadizo (Pa), ladera moderada muy corta rectilínea lisa (Lmmrl), ladera abrupta corta rectilínea lisa (Lacrl)

Hacia el sur del polígono, sobre el eje del afluente al interior del polígono, se da un cambio abrupto de la pendiente, lo cual genera un frente de erosión activo, en este caso cubierto por vegetación densa (ver Figura 170b).

Se observa a lo largo del antiguo ETCR la mala disposición de las aguas servidas y aguas lluvias. En general estas aguas son descargadas sobre las laderas cercanas, lo cual mantienen sectores puntuales de dichas laderas en condiciones saturadas, adicionalmente la formación de surcos que reducen las condiciones de estabilidad. Esta situación se observa a lo largo de las viviendas que limitan con la parte occidental del predio. Es importante conducir dichas aguas hasta los cauces permanentes o drenaje intermitentes que drenan estas áreas mediante canales cubiertos que no permitan la infiltración de estas aguas sobre el terreno.

Los puntos con procesos morfodinámicos activos requieren la intervención con obras de mitigación menores, algunas medidas se presentan en el Capítulo ??.



Figura 166: Vista de componentes geomorfológicas en el antiguo ETCR Llano Grande: Superficie de explanación (Sep), montículo muy bajo con cima convexa plana (Momxp), ladera abrupta corta rectilínea lisa (Lacrl))



(a) Ladera abrupta muy corta rectilínea lisa (Lamrl)



(b) Ladera suave corta rectilínea lisa (Lsclrl)

Figura 167: Vista de componentes geomorfológicas en el antiguo ETCR Llano grande

12.4. Geología para ingeniería

Con el objetivo de definir el conjunto de materiales superficiales (depósitos, suelo, rocas) y definir su comportamiento geomecánico a partir de estimaciones

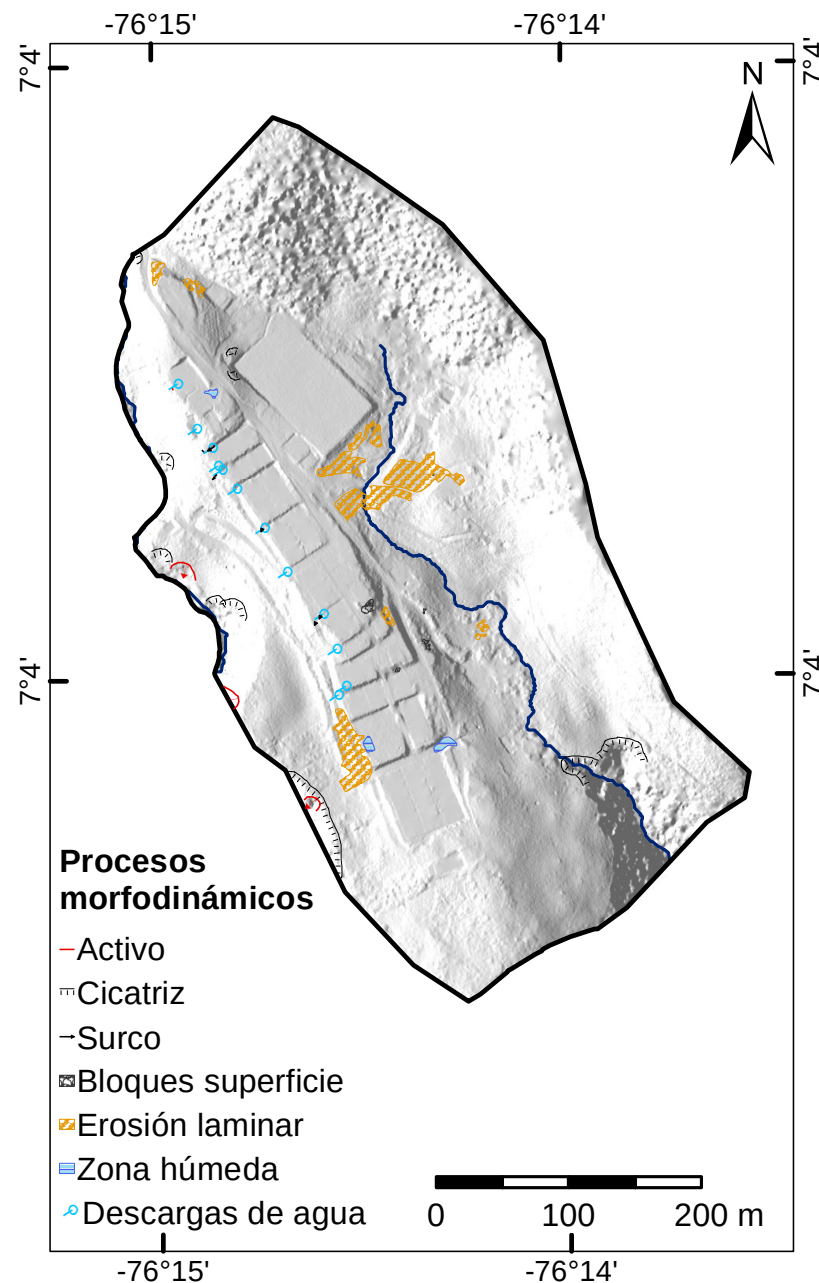


Figura 168: Mapa de procesos morfodinámicos en el antiguo ETCR Llano grande.

de parámetros de campo y laboratorio, se describe a continuación los resultados de la exploración de campo realizada y ensayos de laboratorio.

12.4.1. Exploración y toma de muestras

La etapa de exploración geotécnica en el antiguo ETCR Llano Grande está compuesta por 10 puntos de apiques, dos líneas sísmicas y 13 puntos de perfo-



Figura 169: Movimientos en masa en la ladera oeste del antiguo ETCR Llano grande



Figura 170: Procesos morfodinámicos hacia el sur del polígono del antiguo ETCR y en cercanías de la cancha de fútbol.

ración (ver Figura 171), de las cuales 6 son para fines de construcciones civiles (PTAP y PTARD).

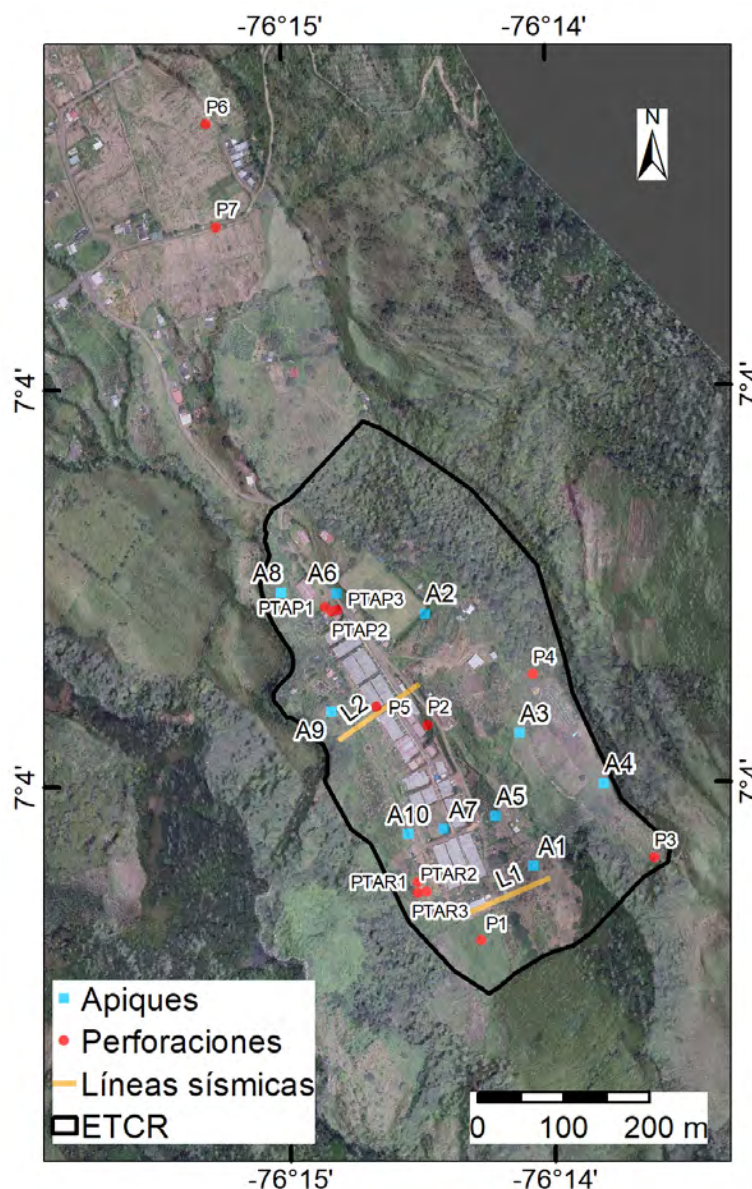


Figura 171: Exploración

La distribución de los puntos exploratorios fueron orientados a caracterizar el material superficial contenido en el polígono atribuido al antiguo ETCR Llano Grande. La selección de dichos puntos está en función de los cambios topográficos, geomorfológicos, litológicos y de pendiente del terreno, observados durante diferentes recorridos de campo. Hacia el norte del predio se realizan dos puntos de exploración por fuera del límite del lindero, debido a que se identifica como un terreno con pendientes y cotas favorables para considerarse como posible

alternativa de ubicación para la PTAP.

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 3m y 6m con diámetro de 55mm tomando muestras cada 50cm en shelby (muestra inalterada) o en cuchara partida (muestra alterada). En la Figura 172 se muestra a modo de ilustración el sistema de apiques y perforaciones realizadas.

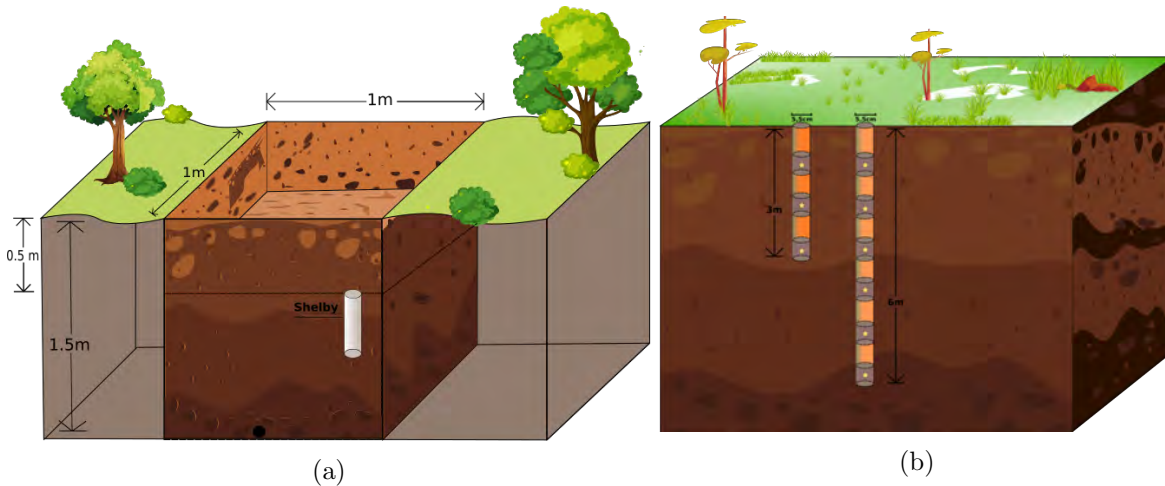


Figura 172: Ilustraciones de apiques y perforaciones. (a) Apique con dimensiones $1 \times 1 \times 1,5\text{m}$ con toma de muestra inalterada a $0,5\text{m}$ de profundidad y alterada a $1,5\text{m}$. (b) Perforaciones a 6m y 3m de profundidad con diámetro de 55mm con toma de muestra alterada o inalterada cada 50cm

12.4.2. Unidades geológicas superficiales

En el antiguo ETCR Llano Grande se identifican 6 unidades geológicas superficiales (UGS) conformadas en general por suelo residual asociado a las litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao (K2alu) (SGC, 2013), depósito aluvial del afluente local y depósito de vertiente de gran magnitud que domina el paisaje en los alrededores y que es objeto de cambios antrópicos en el antiguo ETCR (Ver Figura 173).

El material superficial que predomina en el antiguo ETCR Llano Grande corresponde a antiguo depósito de vertiente de gran extensión desde la parte alta de la ladera, el cual ocupa el 38% del predio del antiguo ETCR. En el mapa de unidades superficiales se simboliza como Dvert y aflora principalmente sobre la ladera oeste y parte sur del predio. Este material se identifica en 5 apiques (AP1, AP5, AP8, AP9 y AP10), y en campo se describe como un material de textura matriz/soportado 75/25 con variación a clasto/soportado en profundidad, húmedo, la matriz es limoarcillosa a limoarenosa de color par-

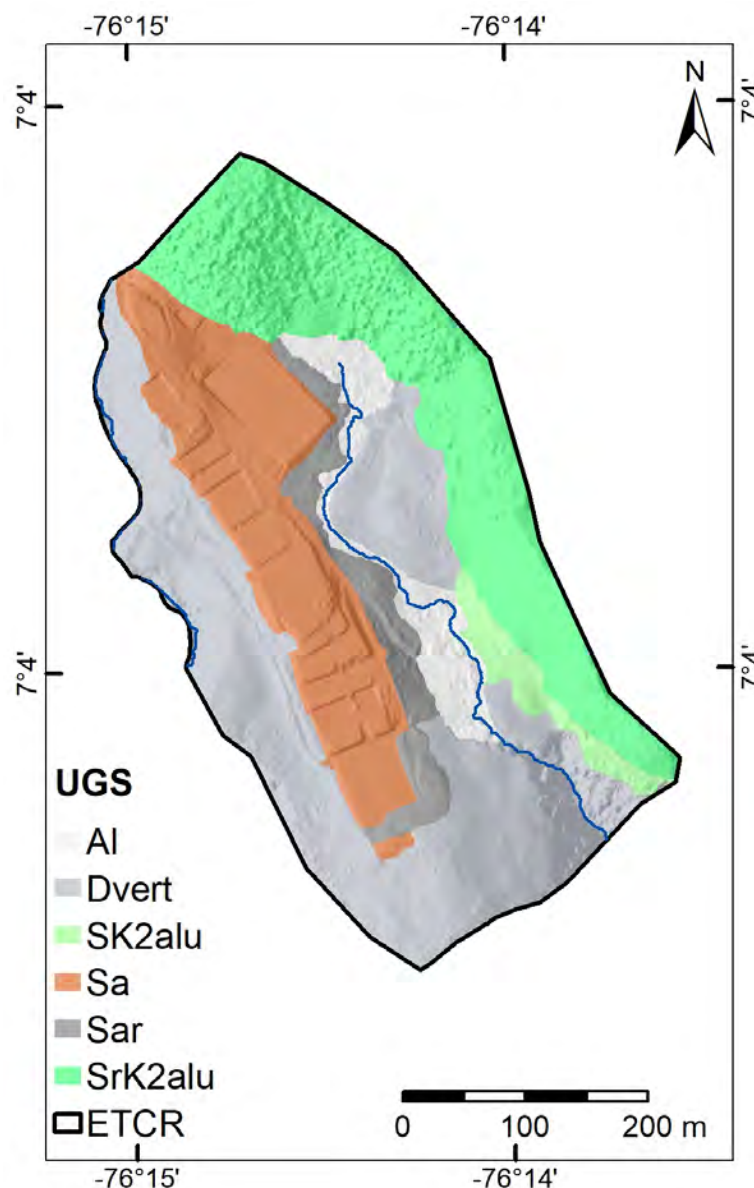


Figura 173: Mapa de unidades geológicas superficiales (UGS) en el antiguo ETCR Llano Grande. Aluvión (Al), depósito de vertiente (Dvert), sapolito de las litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao (SK2alu), suelo antrópico (Sa), suelo antrópico removido (Sar), suelo residual de las litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao (SrK2alu).

do medio a claro con variación a naranja claro, pobremente seleccionado. Está conformado en general por arcilla (40 %), limo (25 %), arena fina (20 %), arena media (10 %) y arena gruesa (5 %) con plasticidad alta a media, de consistencia blanda y cementación débil (ver Figura 174). Los clastos observados en el perfil de los apiques poseen tamaños desde 2cm hasta 54cm, con formas esféricas-discoïdales subangulares, compuestos de roca cristalina ígnea, de tex-

tura porfídica a fanerítica, máfica (gabro verde) con grado de meteorización alta con pátinas de color negro (ver Figura 175a). Se resalta que a lo largo de los recorridos realizados se observaron bloques de diámetros métricos (ver Figura 175b y 175c) y que en algunas zonas se desarrolla suelo residual a partir de grandes bloques contenidos en el depósito.



Figura 174: Depósito de vertiente (Dvert)

El suelo residual a partir de la unidad denominada por SGC (2013) como litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao (SrK2alu) ocupa el 26 % del predio y se distribuye hacia la ladera este del predio. En el área se presenta como un material foliado y esquistoso. Este material se identifica en el apique 4 y en campo se describen los horizontes II y III del perfil de meteorización según la nomenclatura propuesta por Dearman (1974). El horizonte III presenta una textura clasto/soportada con relación 90/10 con estructuras de tipo esquistosidad. La matriz es húmeda de color parda clara a naranja con variación a beige conformada por limo (5 %), arena fina (30 %), arena media (40 %), arena gruesa (20 %) y grava (5 %), no plástica de compacidad suelta. Los clastos son de color gris con óxidos negros de forma discoidal angular con meteorización alta a descompuesta (ver Figura 176). Se asocia a un relieve de alta pendiente.



Figura 175: Tamaño de clastos y bloques que componen el depósito de vertiente (Dvert)

Por otro lado, hacia la parte inferior de la ladera este hacia el sur, aflora el saprolito (horizonte V) a partir de esta misma unidad (SK2alu), identificándose en el apique 3 y ocupando el 3 % del área. En campo se describe como un material de textura matriz/soportado con relación 85/15, arenolimoso que conserva la persistencia de esquistosidad. La matriz es húmeda de color pardo medio conformada por arcilla (10 %), limo (20 %), arena fina (40 %) y arena media (30 %), con plasticidad baja a no plástica. El color de los clastos es gris medio

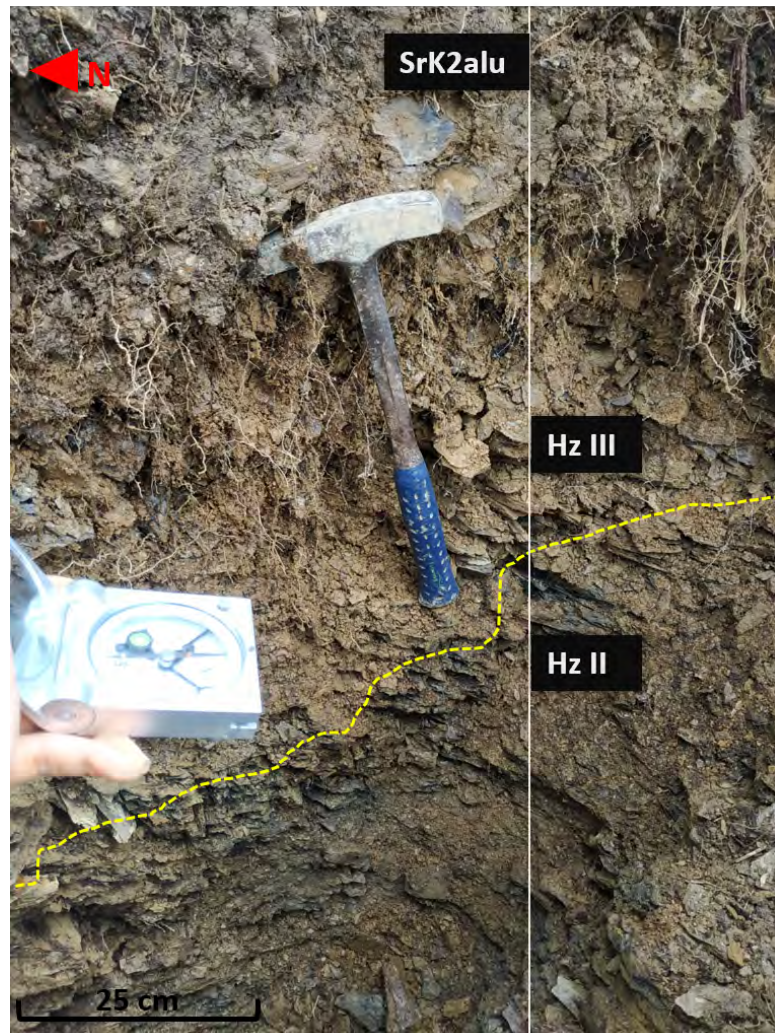


Figura 176: Suelo residual de las litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao (SrK2alu)

a oscuro, de forma discoidal angular, con meteorización moderada, friable, con presencia de pátinas de hierro (ver Figura 177). Como roca fresca se observa en tramos de la vía que conduce desde la cabecera municipal de Dabeiba hacia la vereda Llanogrande.

Las unidades superficiales de suelo antrópico (Sa) así como suelo antrópico removido (Sar) corresponden al depósito de vertiente (Dvert) con modificaciones generadas por la construcción del antiguo ETCR. En el caso de Sa, se caracteriza por ser superficies de explanación sobre la cual se encuentran los diferentes módulos de viviendas y de recreación del antiguo ETCR, encontrándose en la zona central del polígono y ocupando el 21 % del mismo. Este material se identifica en dos apiques (AP7 y AP6) y se describe en campo como un material de textura matriz/soportado con relación 70/30, con matriz húmeda



Figura 177: Saprolito de las litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao (SK2alu)

y de color pardo claro, conformada por arcilla (10 %), limo (30 %), arena fina (30 %) y arena media (30 %), de baja plasticidad y compacidad alta. Los clastos esféricos tabulares, subredondeados a subangulares, con tamaños desde 2cm hasta 10cm, compuesta por roca gris cristalina ígnea con textura porfídica y altamente meteorizada (ver Figura 178).

La unidad de suelo antrópico removido (Sar), corresponde a zonas de acumulación del material removido, producto de la explanación mencionada anteriormente, las cuales se disponen a un costado de Sa, ocupando el 6 % del área del polígono. Se identifica en el apique 2, y se describe en campo como un material de textura intermedia con relación clasto/matriz 50/50. La matriz es seca, de color parda clara a naranja, conformada por arcilla (20 %), limo (30 %), arena fina (25 %), arena media (20 %) y arena gruesa (5 %), con plasticidad media, consistencia muy blanda y compacidad suelta. La forma de los clastos es discoidal-esférica, subredondeado a subangular, con tamaños desde 3cm hasta 10cm (ver Figura 179). A través del modelo de sombras se identifican como zonas con formas de montículos paralelos a la vía y en los bordes de la cancha de fútbol.

La unidad superficial llamada aluvión (Al), ocupa el 6 % del predio y sobre esta se desarrolla la mayor parte de los cultivos presentes en el antiguo ETCR.



Figura 178: Suelo antrópico (Sa)

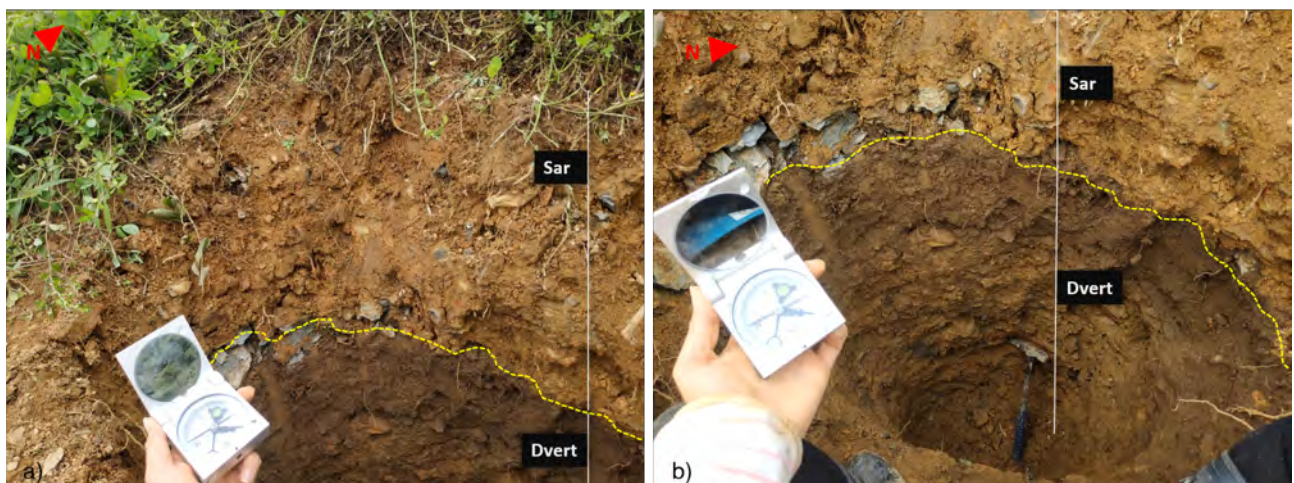


Figura 179: Suelo antrópico removido (Sar)

Los límites de esta unidad se delimitan en campo y a través del DEM pero no se realizan apiques dentro de área de influencia por tratarse de una zona con presencia de agua y por estar ocupada por cultivos.

12.4.3. Prospección sísmica

La prospección sísmica se basa en el estudio de propagación de las ondas sísmicas en el terreno con el fin de determinar el perfil de velocidad de propagación de onda de corte V_s en profundidad. La caracterización geofísica se realiza en función de la rigidez de los materiales que componen el subsuelo por medio de ensayos de ondas superficiales, para estimar el perfil 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 171, 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.

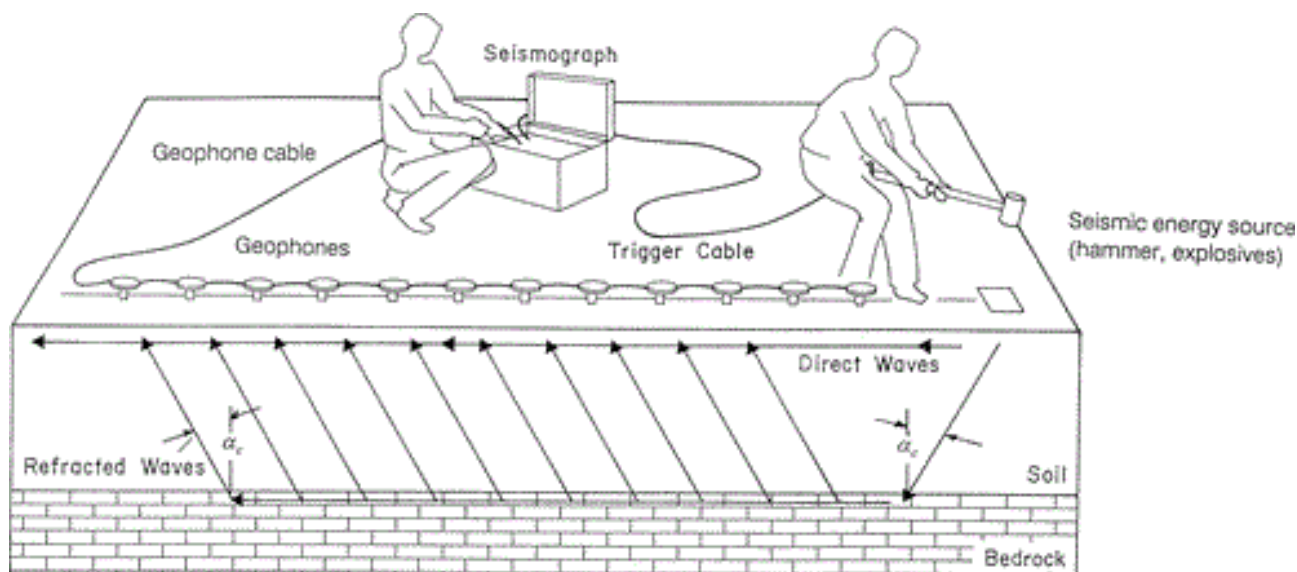


Figura 180: Esquema ensayo de refracción sísmica (ASTM, 2011)

■ Ensayo MASW

El método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales es un método cu-

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 $V_s 30(m/s)$
A	Roca competente	≥ 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)	

Las principales ventajas son emplear ondas Rayleigh generadas de manera activa; producidas artificialmente para definir la velocidad de propagación de las ondas sísmicas superficiales y definir la configuración del subsuelo. La fuente emisora se genera mediante golpes con una masa en lugares previamente definidos denominados puntos de tiro, las ondas se propagan hasta los receptores (geófonos) (Figura 180). 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).

■ Ensayo ReMi

Es un método de análisis por Refracción de Microtremores que estima la velocidad de 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 géofonos 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 2D de la línea 1 (Figura. 181) se observa superficialmente un suelo de consistencia blanda con V_s menor a 200m/s hasta los 2m aproximadamente. Avanzando en profundidad se presenta una transición de suelo semi-rígido a rígido, con V_s entre 200 y 410m/s que avanza hasta 11m aproximadamente. A continuación, se registra un suelo rígido a muy denso, con V_s que alcanzan 500m/s y se extiende hasta aproximadamente 17m. Posterior se registró una

capa de suelo muy densa a roca blanda con V_s hasta los 1100m/s hasta la máxima profundidad explorada (35m).

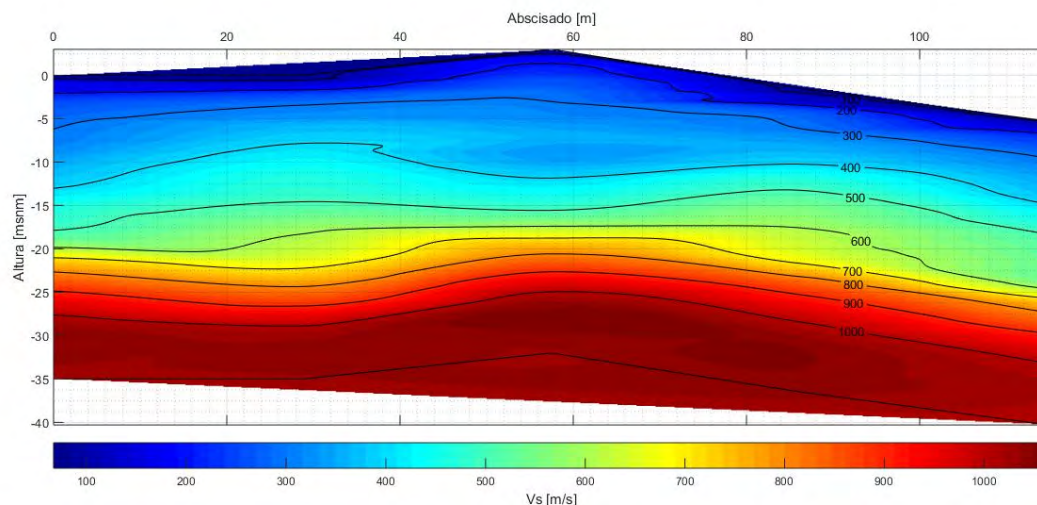


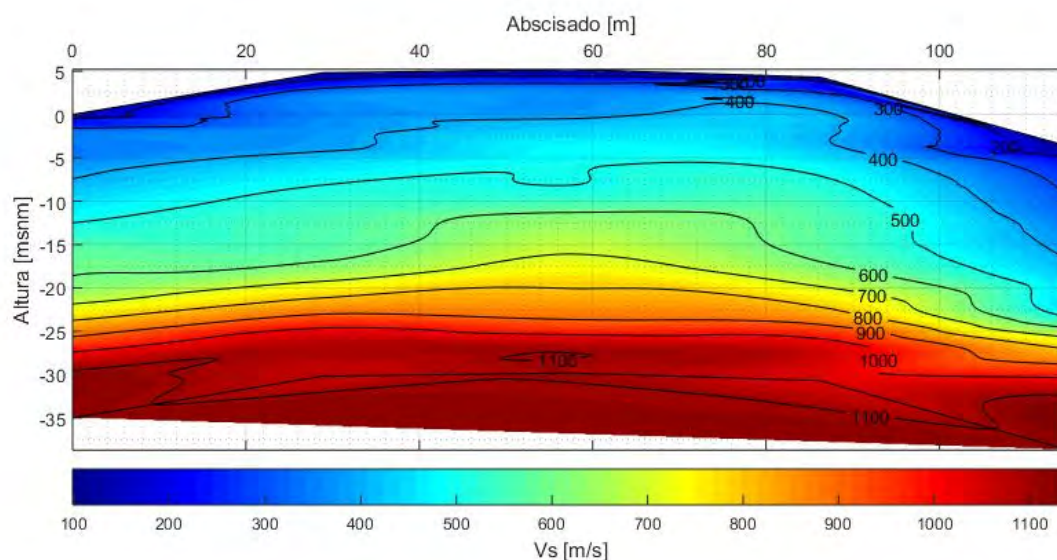
Figura 181: Perfil 2D V_s línea 1

En la línea sísmica 2 (Figura. 182) entre las abscisas 20-100 se observa un material más denso que en los extremos, que se extiende hasta los 5m aproximadamente en la zona central y 10m en los extremos, el material es semi-rígido a rígido con V_s hasta los 390m/s. A partir de esta profundidad se registró un suelo rígido a muy denso, con V_s entre 390 y 580m/s, el cual se extiende hasta 16m de profundidad. Bajo esta capa se registran materiales con V_s que incrementan en profundidad hasta registrar 1000m/s aproximadamente, V_s asociado a rocas blandas.

A partir de los ensayos ejecutados se determina los diferentes perfiles de suelos acorde a la velocidad de onda en corte en los 30m superficiales V_{s30} , para ambas líneas ejecutadas el subsuelo se clasifica en perfil de suelo C acorde a lo determinado por la NSR-10 (A- 2.4.1).

12.4.4. Análisis de laboratorio

A partir de la exploración directa realizada en el antiguo ETCR se definió la ejecución de una serie de ensayos de laboratorio en muestras alteradas e inalteradas, con el propósito de caracterizar física y mecánicamente los materiales que conforman el subsuelo explorados en los distintos apiques y perforaciones. En la tabla 70 se presentan los ensayos y cantidad realizados como parte de


Figura 182: Perfil 2D V_s línea 2

la exploración geotécnica contemplada en la caracterización detallada para la evaluación de la amenaza y el estudio geotécnico de las plantas de tratamiento de agua potable y residual.

Tabla 70: Distribución ensayos de laboratorio

Ensayo	Cantidad	Normas
Humedad natural	49	ASTMD2216
límites de consistencia	24	ASTMD4318
Granulometría por tamizado y lavado sobre la malla No.200	24	ASTMD422
Peso unitario	20	ASTMD7263
Consolidación unidimensional	3	ASTMD2435
Colapso o expansión unidimensional	2	ASTMD4546
Compresión simple o inconfiada	8	ASTMD2166
Corte directo - Consolidado drenado	9	ASTMD2080
Triaxial- Consolidado no drenado (CIU-TXC)	4	ASTMD4767

Adicionalmente, se presenta la Tabla 71 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
- γ_h : Peso unitario húmedo (kN/m^3)
- γ_s : Peso unitario seco (kN/m^3)
- Su: Resistencia a la compresión uniaxial no drenada (kPa)
- c' : cohesión (kPa)
- ϕ : ángulo de fricción (grados)
- k: conductividad hidráulica saturada (m/s)

Tabla 71: Recopilación de parámetros obtenidos mediante ensayos de laboratorio

ID	P (m)	LL	LP	IP	%G	%A	%F	USCS	γ_h (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	Su (kPa)	c' (kPa)	ϕ (°)	k (m/s)
AP-01-M1	0,5	53,0	44,0	9,0	9,8	11,2	79,0	MH	15,5	9,3		49,0	28,0	
AP-02-M1	0,5	45,0	40,0	5,0	53,1	9,2	37,7	GM	16,2	10,6	49,6			
AP-03-M1	0,5	51,0	44,0	7,0	48,8	9,8	41,4	GM	15,8	10,5	27,5			
AP-05-M1	0,5	52,0	43,0	9,0	54,8	6,2	39,0	GM	17,6	12,6	36,4			
AP-06-M2	1,5	34,0	28,0	6,0	38,6	13,6	47,8	GM						
AP-07-M1	0,5	46,0	37,0	9,0	35,7	14,3	50,0	ML	15,9	11,7				8,60E-09
AP-08-M1	0,5	43,0	38,0	5,0	64,4	9,0	26,6	GM	16,9	12,0		24,0	33,0	
AP-09-M1	0,5	48,0	43,0	5,0	53,9	6,5	39,6	GM	15,1	9,4	23,0			
AP-10-M1	0,5	49,0	45,0	4,0	9,6	10,9	79,5	ML	17,0	10,4		18,0	26,0	
PP-01-M1	0,8	39,0	35,0	4,0	73,4	6,7	19,9	GM	19,1	14,0		56,0	33,0	
PP-01-M3	2,8	49,0	35,0	14,0	37,5	12,5	50,0	ML	19,1	13,8				
PP-01-M4	3,8											0,0	38,0	
PP-02-M1	0,5											80,0	38,0	
PP-02-M3	2,8	52,0	39,0	13,0	39,1	13,8	47,1	GM						
PP-03-M1	0,8	46,0	38,0	8,0	57,4	16,7	25,9	GM						
PP-03-M3	2,8								19,6	16,4				
PP-04-M4	3,8	49,7	42,0	7,7	44,9	38,4	16,7	GM	18,1	12,6		10,0	38,0	
PP-05-M1	0,8	47,0	31,0	16,0	33,3	24,6	42,1	GM	16,9	13,1	45,4			
PP-06-M1	0,8	37,0	25,0	12,0	65,8	18,7	15,5	GM	14,8	11,1	47,5			
PTAP-01-M1	0,8													
PTAP-01-M3	2,8											74,0	35,0	6,00E-07
PTAP-01-M4	3,8	32,0	28,0	4,0	41,9	14,8	43,3	GM						
PTAP-02-M2	1,8	32,0	29,0	3,0	24,5	13,2	62,3	ML						
PTAP-03-M3	2,8											0,0	38,0	
PTAP-03-M6	5,8	37,0	30,0	7,0	43,6	13,6	42,8	GM						
PTAR-01-M1	0,8	31,0	29,0	2,0	62,6	14,0	23,4	GM	16,1	10,9	34,1			
PTAR-01-M4	3,8								18,8	14,3		54,0	36,0	
PTAR-01-M6	5,8	37,0	28,0	9,0	31,3	9,0	59,7	ML						
PTAR-02-M1	0,8								17,2	12,2				2,30E-07
PTAR-02-M3	2,8								19,5	14,9		0,0	38,0	
PTAR-02-M4	3,8								18,8	14,3	36,8	87,0	31,0	
PTAR-02-M5	4,8	36,0	29,0	7,0	16,9	10,5	72,6	ML						
PTAR-03-M2	1,8	45,0	39,0	6,0	54,8	13,8	31,4	GM						
PTAR-03-M3	2,8								19,8	13,5		96,0	34,0	
PTAR-03-M6	5,8	37,0	30,0	7,0	43,6	13,6	42,8	GM						

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 (ϕ') drenados mediante el uso de correlaciones con los números de golpes (N-SPT) corregidos por factores de confinamiento y energía propuestos por Bowles y cols. (1996). El método de Gonzalez (1999) fue implementando en los distintos valores de N-SPT registrados a profundidad en las perforaciones ejecutadas que alcanzaron los 11m. No obstante, se consideró únicamente el valor aproximado de ϕ' obtenido por la metodología, al proveer un mayor desempeño y aproximación de las correlaciones para materiales granulares o intermedios, en comparación con materiales cohesivos (Montenegro, 2014). Para mayor detalle en la metodología empleada se sugiere consultar el Anexo (Correlaciones con N-SPT) del estudio de las plantas de tratamiento de agua potable y residual.

Como parte de la caracterización hidráulica de las zonas geotécnicas homogéneas se estimaron los valores de conductividad hidráulica saturada K_s a partir de diferentes aproximaciones; se contempla los valores aproximados de los ensayos de consolidación unidimensional. Adicionalmente, se emplea funciones de Pedotransferencia (PTF) mediante el modelo ambiental SPAW (Saxton, Johnson, y Shaw, 1974), con el propósito de estimar la conductividad hidráulica saturada a partir de la textura del suelo (Wösten, Pachepsky, y Rawls, 2001). Igualmente, se considera como límites el rango de valores reportados en <http://www.geotechdata.info/parameter/>.

A continuación se presentan los valores y variación de los parámetros asignados a cada una de las zonas geotécnicas homogéneas mediante la metodología descrita anteriormente, la variación de los parámetros se establece a partir de estadísticos de tendencia central (media, moda y mediana).

Zona 1 – Dvert: Esta zona presenta principalmente suelos compuestos por gravas limosas (GM) y en menor proporción limos de baja y alta plasticidad (ML - MH), tal como se muestra en la distribución de los diferentes puntos en la carta de plasticidad (Figura 183). Los valores obtenidos para N-SPT oscila entre 8 golpes/0,3m a nivel superficial en la zona de la PTAR y 72 golpes/0,3m en la zona norte en la P6. Los parámetros de resistencia reportados presentan una media de 45,8 kPa y 33,9° para la cohesión y ángulo de fricción, respectivamente.

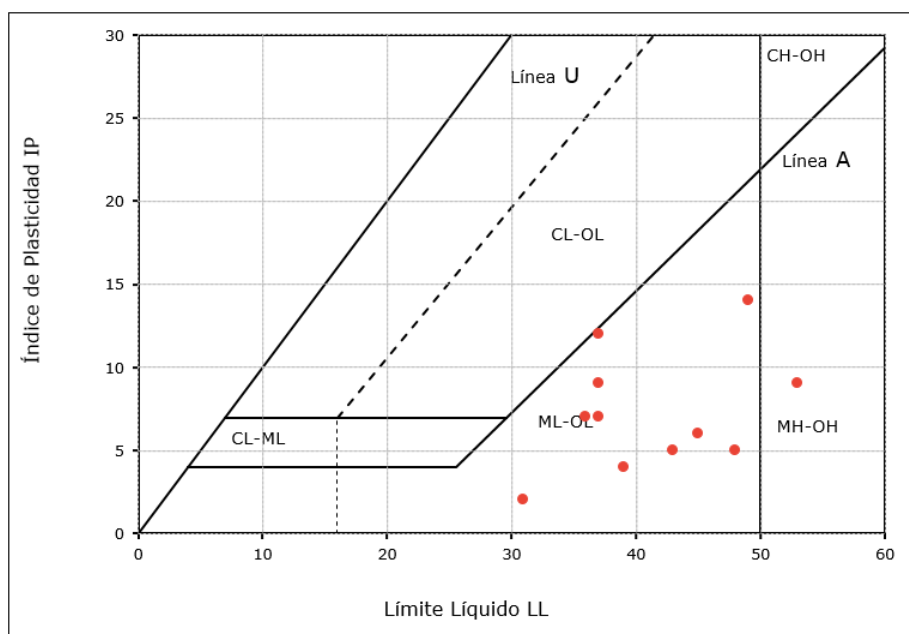


Figura 183: Variabilidad en los límites de consistencia de la zona 1 mediante la Carta de plasticidad de Casagrande.

Zona 2 – Sa: Según los puntos explorados la zona presenta en su mayoría suelos compuestos por gravas limosas (GM) y en menor proporción limos de baja plasticidad (ML), tal como se muestra en la distribución de los diferentes puntos en la carta de plasticidad (Figura 184). Los valores de N-SPT oscilan entre 2 y 63 golpes/0,3m. Los parámetros de resistencia reportados presentan una media de 51,3 kPa y 37,0° para la cohesión y ángulo de fricción, respectivamente.

Zona 3 – Sar: Esta zona está constituida por gravas limosas (GM) y limo de baja plasticidad (ML), como se muestra en la distribución de los diferentes puntos en la carta de plasticidad (Figura 185). Se reportan parámetros de resistencia asociados al Apique 10, 18,0 kPa para la cohesión y 26,0° para el ángulo de fricción.

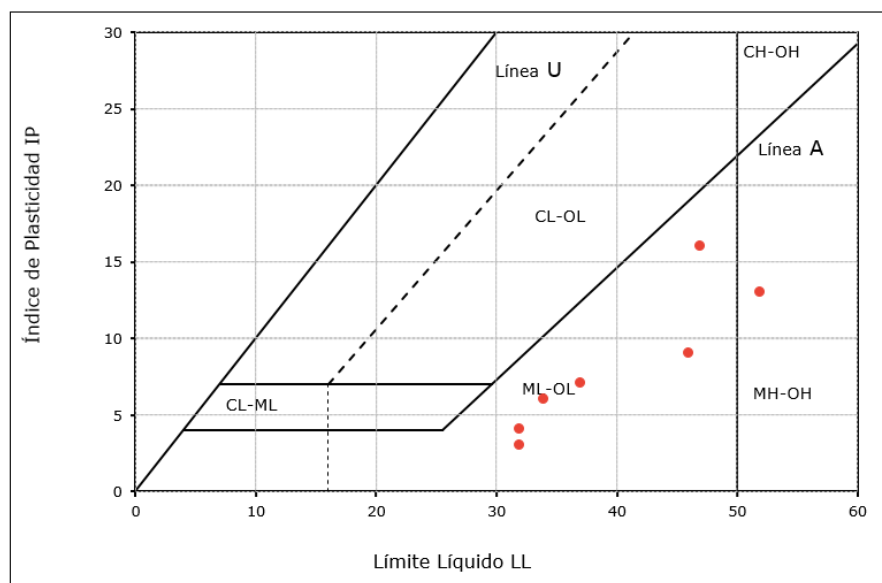


Figura 184: Variabilidad en los límites de consistencia de la zona 2 mediante la Carta de plasticidad de Casagrande.

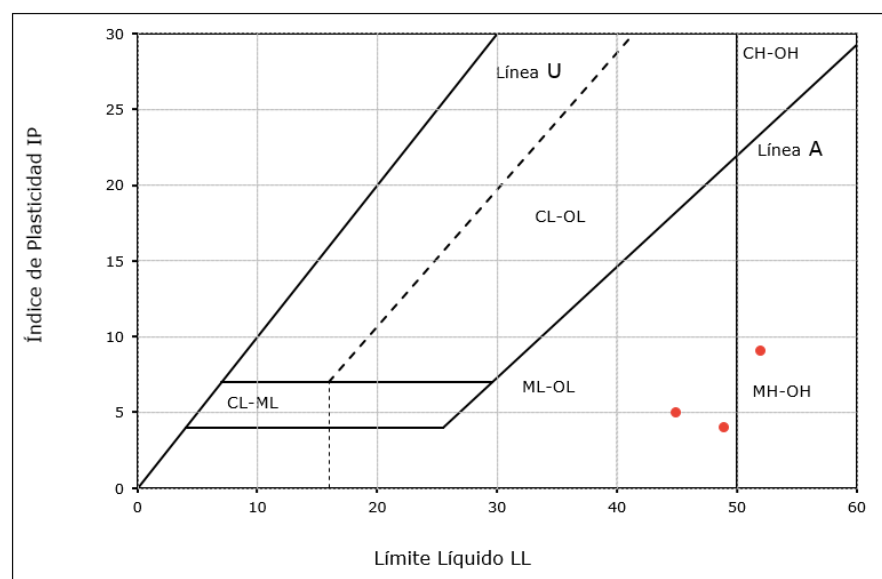


Figura 185: Variabilidad en los límites de consistencia de la zona 3 mediante la Carta de plasticidad de Casagrande.

Zona 4 – A1: Esta zona presenta suelos compuestos principalmente por gravas limosas (GM) se presentan en menor proporción limos de baja plasticidad y limo de alta plasticidad (MH), tal como se muestra en la distribución de los diferentes puntos en la carta de plasticidad (Figura 186). Los valores de N-SPT oscilan entre 8 y 72 golpes/0,3m. Los parámetros de resistencia reportados presentan una media de 45,8 kPa y 33,9° para la cohesión y ángulo de fricción,

respectivamente.

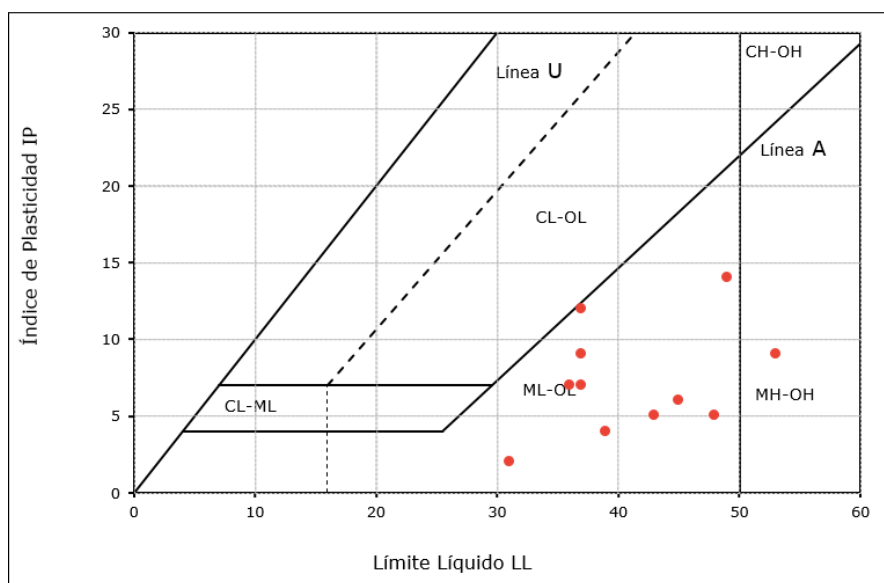


Figura 186: Variabilidad en los límites de consistencia de la zona 4 mediante la Carta de plasticidad de Casagrande.

Zona 5 – SK2alu: Esta zona está constituida por gravas limosas (GM), como se muestra en la distribución de los diferentes puntos en la carta de plasticidad (Figura 185). Los valores obtenidos para N-SPT se encuentran entre 6 y 8 golpes/0,3m, obtenidos en la P3.

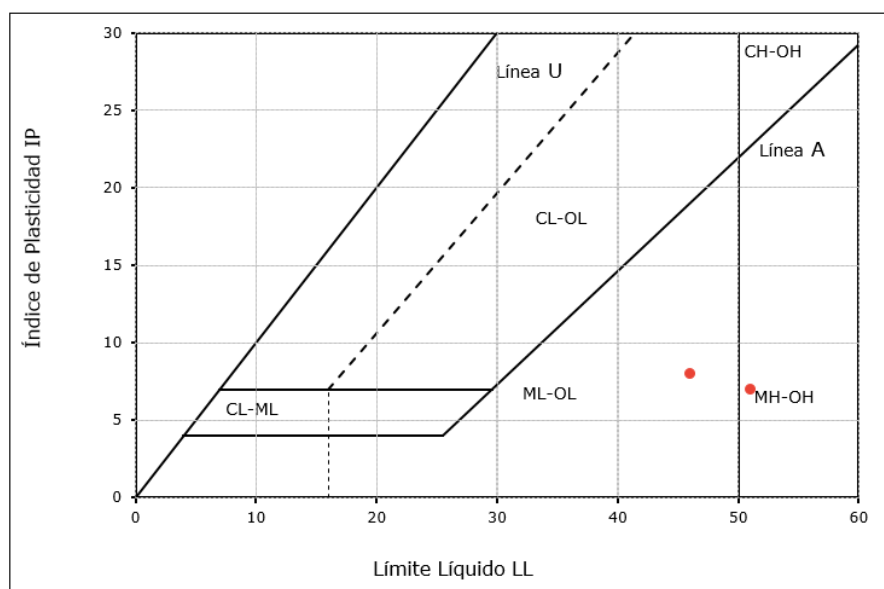


Figura 187: Variabilidad en los límites de consistencia de la zona 5 mediante la Carta de plasticidad de Casagrande.

Zona 6 – SrK2alu: En la zona se presenta grava limosa (GM), como se presenta en la distribución de los diferentes puntos en la carta de plasticidad (Figura 185). Los valores obtenidos para N-SPT se encuentran entre 7 y 28 golpes/0,3m. Se reportan parámetros de resistencia asociados a la P4, 10,0 kPa para la cohesión y $38,0^\circ$ para el ángulo de fricción.

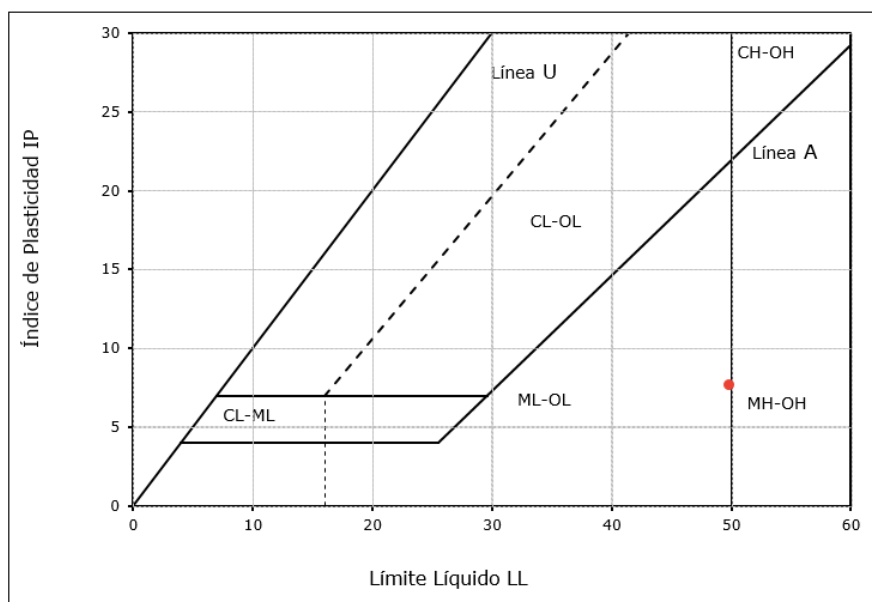


Figura 188: Variabilidad en los límites de consistencia de la zona 6 mediante la Carta de plasticidad de Casagrande.

Tabla 72: Parámetros geotécnicos para las unidades geológicas superficiales

Zona	Clasificación U.S.C.S	c' (kPa)	ϕ°	$\gamma_h(kN/m^3)$	$K_s(m/s)$
1 – Dvert	GM	51,5	33,5	18	$1,58 \times 10^{-6}$
2 – Sa	GM	74	38	16,4	$5,0 \times 10^{-8}$
3 – Sar	GM	18	26	17	$2,96 \times 10^{-6}$
4 – Al	GM	51,5	33,5	18	$1,58 \times 10^{-6}$
5 – SK2alu	GM	10	27,4	15,8	$3,74 \times 10^{-6}$
6 – SrK2alu	GM	10	38	18,1	$5,0 \times 10^{-6}$

12.5. TRIGRS

12.5.1. Amenaza por movimientos en masa superficiales

En este tipo de movimientos en masa, el material desplazado suele ser de poco espesor, con la influencia de una deformación interna prácticamente nula, movilizándose sobre una superficie de falla paralela a la pendiente, que en

ocasiones puede ser escalonada (Cruden, 1996; Hutchinson, 1988). Generalmente, la relación profundidad/longitud (D/L) es menor de 0,1, según Skempton y Hutchinson (1969), debido principalmente a la disposición de los horizontes de suelo, en los que la capa más superficial se encuentra superpuesta a una capa con permeabilidad inferior, permitiendo el desarrollo de un plano de falla paralelo a la superficie (Cruden, 1996; Sidle y Ochiai, 2013). Los movimientos en masa con características planares, no son autoestabilizantes, lo que ocasiona que la velocidad del movimiento pueda ser muy alta, teniendo en cuenta la inclinación y extensión de la superficie (SGC, 2017). Estos movimientos son detonados principalmente eventos intensos de lluvia de corta duración, en los que se reduce considerablemente la succión matricial existente entre las partículas del suelo, relacionado con el incremento en la humedad sobre la zona parcialmente saturada, aumentando las presiones de poros, lo cual genera pérdida en la resistencia al cortante del material (Li, Yue, Tham, Lee, y Law, 2005; Rahardjo, Lim, Chang, y Fredlund, 1995). Debido a esto, se plantea la evaluación de este tipo de movimiento superficial de naturaleza traslacional, mediante el uso del modelo de talud infinito, aplicando el modelo de base física TRIGRS (Figura 189).

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

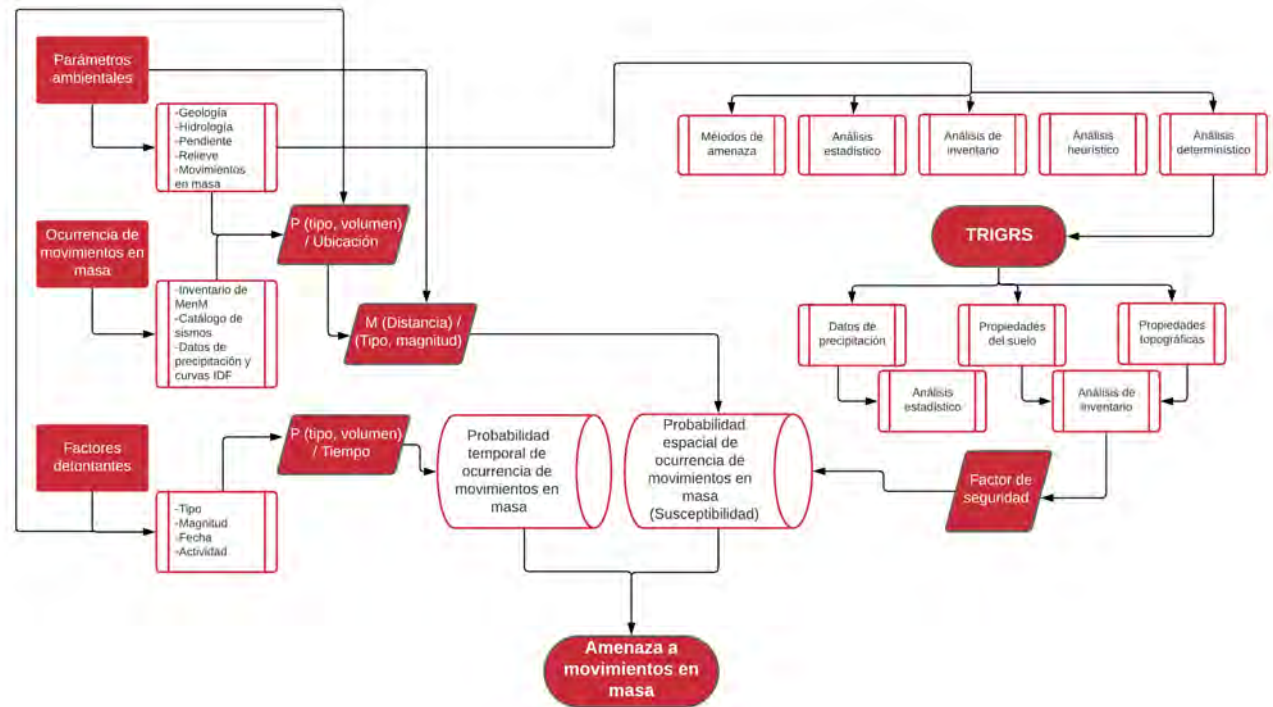


Figura 189: Esquema metodológico de la evaluación de amenaza empleando TRIGRS como modelo de amenaza. Adaptado de van Westen y cols. (2008)

para una superficie inclinada:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \cdot [K(\psi) \cdot (\frac{1}{\cos^2 \delta} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial Z} - 1)] \quad (12.1)$$

Donde, Z es la profundidad bajo la superficie del terreno (dirección de la coordenada vertical, positiva hacia abajo), (ψ) es la cabeza de presión, $K(\psi)$ es la función de la conductividad hidráulica y (δ) el ángulo del talud (Figura 190).

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:

$$K(\psi) = K_s \exp(\alpha \cdot \psi^*) \quad (12.2)$$

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \exp(\alpha \cdot \psi^*) \quad (12.3)$$

Donde (ψ) es la cabeza de presión; $(\psi^*) = (\psi) - (\psi_0)$, con (ψ_0) como una constante $((\psi_0) = 0$ o $(\psi_0) = -1/(\alpha))$; $K(\psi)$ es la función de la conductividad

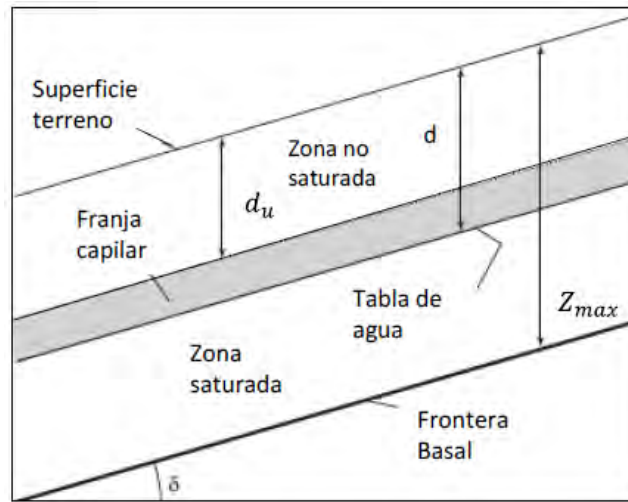


Figura 190: Condiciones hidrológicas en los estratos superficiales del suelo. Adaptado de Baum y cols. (2008)

hidráulica, (K_s) la conductividad hidráulica saturada; (θ) es el contenido volumétrico de agua, (θ_r) el contenido de agua residual, (θ_s) el contenido de agua en saturación y (α) 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 con 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, (ϕ') el ángulo de fricción efectivo, (γ_w) el peso unitario del agua, (γ_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 (δ) , sus valores máximos y míni-

mos $((\delta_{max})$ 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 72). Con respecto a los valores de θ_r , θ_s y α 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 θ_r , θ_s y α correspondientes a 11 clases de textura de suelo. En la tabla (Tabla 73) se presentan la clase de textura y valores de θ_r , θ_s , α y K_s adoptados para la caracterización de los materiales a partir de las zonas geotécnicas homogéneas.

Tabla 73: Parámetros hidráulicos empleados en la condición parcialmente saturada para las zonas geotécnicas homogéneas.

Zona	Textura	θ_r (m^3/m)	θ_s (m^3/m)	α ($1/kPa$)	K_s (m/s)
1 - Dvert	franco limoso	0,16	0,54	0,19	$1,58x10^{-4}$
2 - Sa	franco limoso	0,16	0,54	0,19	$5x10^{-8}$
3 - Sar	franco limoso	0,16	0,54	0,19	$2,96x10^{-6}$
4 - Al	franco limoso	0,16	0,54	0,19	$1,58x10^{-6}$
5 - SK2alu	franco limoso	0,16	0,54	0,19	$3,74x10^{-6}$
6 - SrK2alu	franco limoso	0,16	0,54	0,19	$5x10^{-6}$

Entendiendo la lluvia como factor detonante, se plantean los escenarios en términos de intensidad y duración de la tormenta de diseño, evaluando los escenarios de lluvia en estado transitorio junto con el análisis del proceso de inestabilidad de forma estacional. Como insumo para la determinación de los escenarios de precipitación en el antiguo ETCR Llano Grande, 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 74).

Tabla 74: Intensidades de Lluvia

Intensidad (mm/h)	
Tr=10 años 1 hora	Tr=100 años 4horas
54.71	28.05

Posteriormente, con el objetivo de evaluar la incertidumbre de las variables que intervienen en el resultado de la amenaza para movimientos en masa de tipo superficial; es necesaria la incorporación de modelos de confiabilidad que permitan cuantificar la interacción de las variables e insumos para el resultado del factor de seguridad, evaluando consistentemente la estabilidad y validar los resultados obtenidos por el modelo de talud infinito (TRIGRS), en el cual los insumos fueron obtenidos mediante ensayos de laboratorio. Entre los modelos de confiabilidad más utilizados en la geotecnia, resaltan el método de Monte Carlo, FOSM y estimativas puntuales (Augusto y Hidalgo, 2011), para los objetivos requeridos, se emplea el método estadístico FOSM. A continuación, se presenta la descripción de este modelo.

12.5.2. Modelo FOSM (First Order Second Moment)

Este método se basa en el truncamiento de la función de expansión de la serie Taylor, con la cual se determina la distribución de probabilidad de una función con un número de variables aleatorias (Baecher y Christian, 2003). Las ventajas de este modelo consisten en que los cálculos son simplificados y que solo es necesario el conocimiento de los valores de los momentos de las distribuciones estadísticas de las variables que forman la función, expresados en la media y la varianza de cada variable, asumiendo una distribución normal tanto para las variables como para el Factor de Seguridad. De esta manera, para N variables aleatorias no correlacionadas $F(x_1, x_2, \dots, x_N)$, conservando solamente los términos del primer orden (lineales) de la serie de Taylor se producen las siguientes expresiones:

$$[FS] = F(\bar{x}_1, x_2, \dots, \bar{x}_N) \quad (12.6)$$

$$V[FS] = \sum_{i=1}^N \left(\frac{dF_s}{dx_i} \right)^2 V(x_i) \quad (12.7)$$

Donde $\bar{x}_i$ y $V(x_i)$ son la media y varianza de cada variable aleatoria, respectivamente. Para los valores de las derivadas usualmente se utiliza la aproximación

numérica dada por Christian, Ladd, y Baecher (1994):

$$\frac{dFS}{dx_i} = \frac{F(x_i + \Delta x_i) - F(x_i)}{\Delta x_i} \quad (12.8)$$

Finalmente al utilizar este modelo, se obtiene el índice de confiabilidad del FS, calculado de la siguiente forma:

$$\beta I = \frac{E[FS] - 1}{\sigma[FS]} \quad (12.9)$$

Donde $E[FS]$ es el valor esperado del factor de seguridad calculado con los parámetros medios de las variables independientes y $\sigma[FS]$ es la desviación estándar del factor de seguridad obtenida por la Ecuación (12.9), teniendo como el FS crítico el valor igual a 1. Este índice expresa la confiabilidad de FS en relación con la probabilidad de falla o ruptura. Para este proyecto se evalúa el modelo FOSM a partir de las variaciones de los parámetros de resistencia (cohesión, ángulo de fricción), el peso unitario húmedo y conductividad hidráulica saturada (Tabla 75).

Tabla 75: Valores medios y porcentaje de variación para el modelo FOSM (Assis y cols., 2012)

	Variación	Media					
		Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6
Cohesión (Pa)	40 %	51500	74000	18000	51500	10000	10000
Ángulo de fricción ($^{\circ}$)	10 %	33.5	38	26	33.5	27.4	38
Peso Unitario húmedo (N/m^3)	3 %	18000	16400	17000	18000	15800	18100
Conductividad hidráulica saturada (m/s)	90 %	1.58E-06	5.00E-08	2.96E-06	1.58E-06	3.74E-06	5.00E-06

Los resultados de factor de seguridad del modelo TRIGRS son incorporados en el análisis de confiabilidad, descrito anteriormente, donde como resultado de la metodología FOSM se obtiene el índice de confiabilidad (β). En las Figuras 191, 192, 193, 194 se presentan los resultados de índice de confiabilidad para los escenarios de lluvia especificados (Tabla 74). 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 (β)<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).

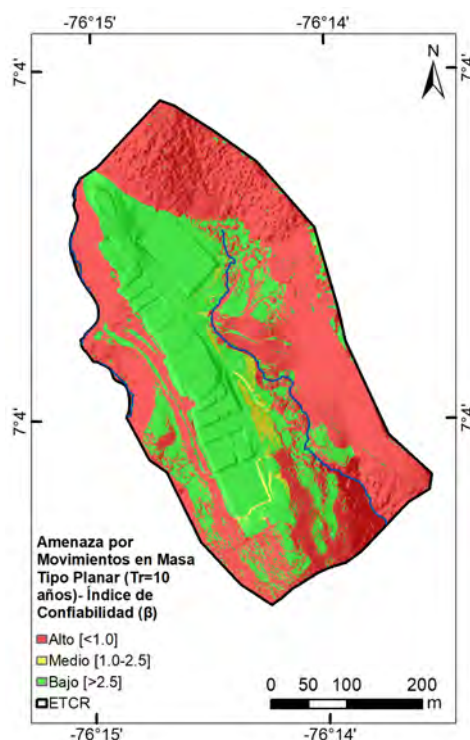


Figura 191: Amenaza por movimientos en masa tipo planar- a) Escenario Tr=10 años parcialmente saturado

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 de las capas del subsuelo (Figura195).

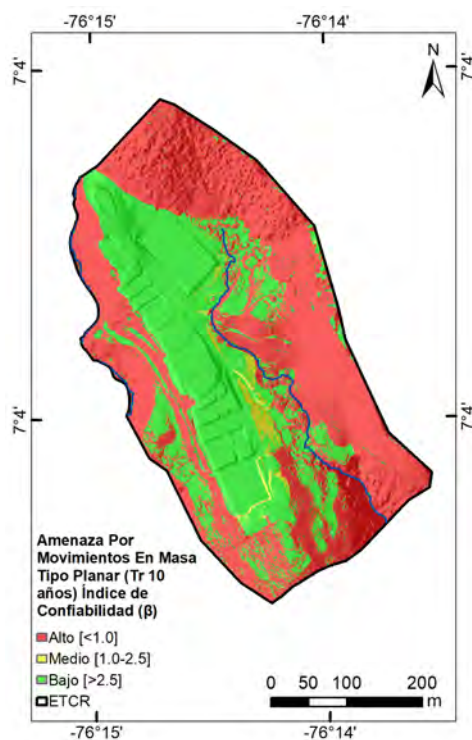


Figura 192: Amenaza por movimientos en masa tipo planar- Escenario $Tr=10$ años saturado

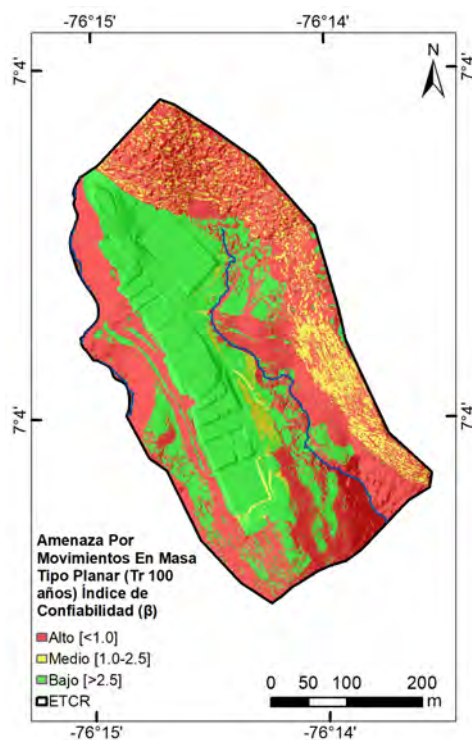


Figura 193: Amenaza por movimientos en masa tipo planar- Escenario $Tr=100$ años parcialmente saturado

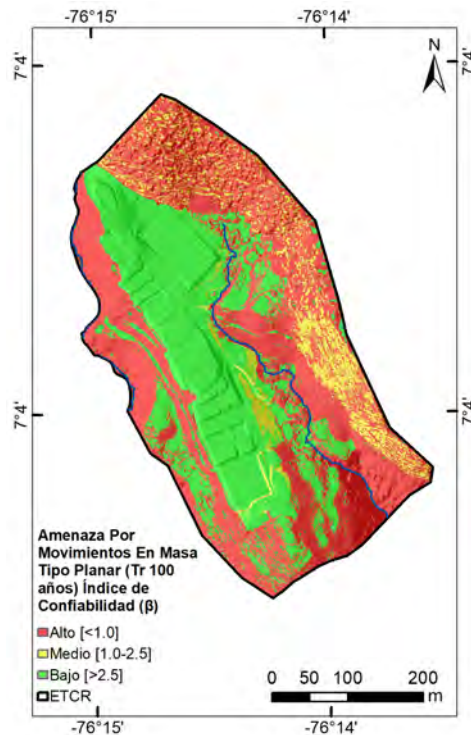


Figura 194: Amenaza por movimientos en masa tipo planar- Escenario Tr=100 años saturado

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.

Para la implementación del modelo de estabilidad se deben ingresar diferentes parámetros básicos para representar las condiciones físicas del subsuelo (ver Tabla.76) 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 (Esquisto) de

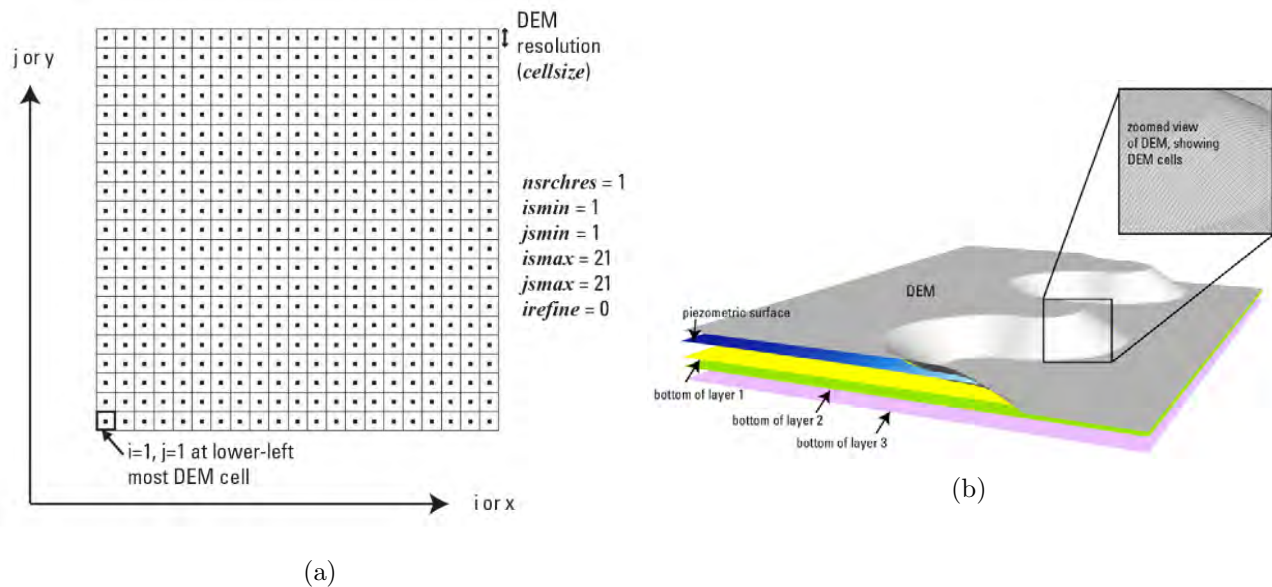


Figura 195: a) Matriz de análisis Scoops3D (Reid y cols., 2015). b) Capas de entrada

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. 171) y el ensayo de la línea sísmica donde se evidencian cambios a materiales más competentes. La primera capa se limita a los espesores expuestos en TRIGRS y la segunda se limita hasta los 22m, zona con velocidades de onda hasta los 760m/s.
- Superficie piezométrica, estimada haciendo uso del modelo de Catani y cols. (2010) para la distribución espacial del nivel de agua, considerando una profundidad de 6m para el nivel de agua alto, se considera 6m como profundidad máxima debido a que en la exploración ejecutada que alcanzó los 6m de profundidad no se identificó el NF.

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

Tabla 76: Parámetros geotécnicos para análisis en Scoops3D.

	Zona	c' (kPa)	ϕ°	$\gamma_h(kN/m^3)$
1	Dvert	51,5	33,5	18
	Esquisto	250	27,5	26,5
2	Sa	74	38	16,4
	Dvert	51,5	33,5	18
	Esquisto	250	27,5	26,5
3	Sar	18	26	17
	Dvert	51,5	33,5	18
	Esquisto	250	27,5	26,5
4	Al	51,5	33,5	18
	Dvert	51,5	33,5	18
	Esquisto	250	27,5	26,5
5	SK2alu	10	27,4	15,8
	Esquisto	250	27,5	26,5
6	SrK2alu	10	38	18,1
	Esquisto	250	27,5	26,5

Fellenius (1936), es usado el método simplificado de Bishop (1955) con el cual los resultados son más precisos y similares a otros métodos de equilibrio limite más rigurosos (Hungr, 1987; Lam y Fredlund, 1993).

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

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

El Factor de seguridad (F) es el resultado de un análisis iterativo, evaluando la estabilidad mediante la sumatoria de fuerzas en cada columna de análisis (Figura 196). 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.

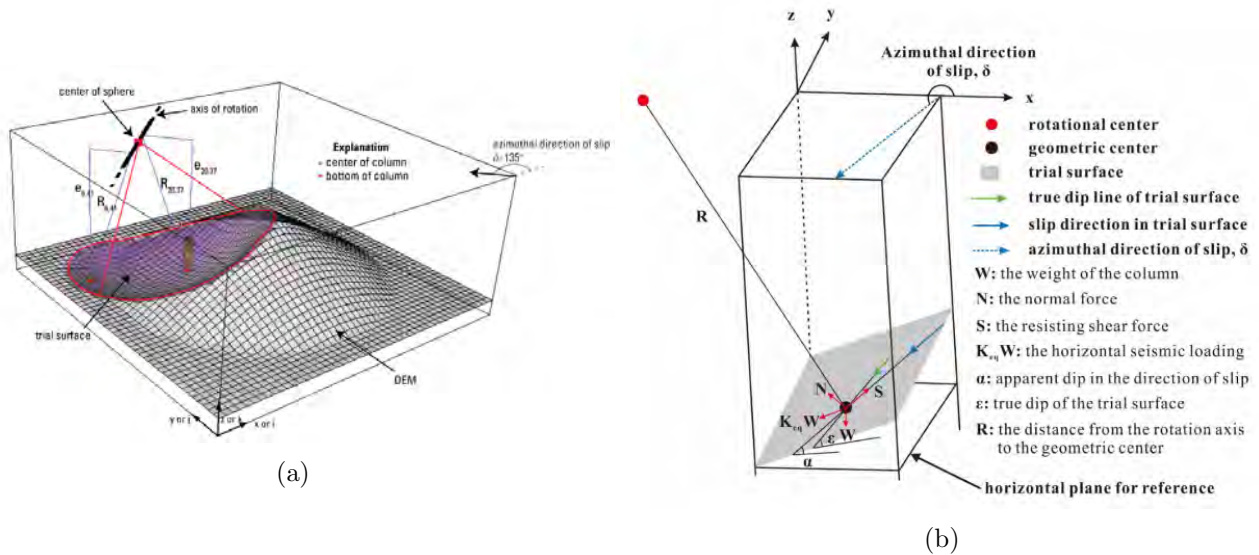


Figura 196: a) Diagrama 3D del análisis de estabilidad (Reid y cols., 2015). b) Diagrama de fuerzas sobre columna típica (Zhang y Wang, 2019)

$\alpha_{i,j}$ 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 azimuthal 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.197)

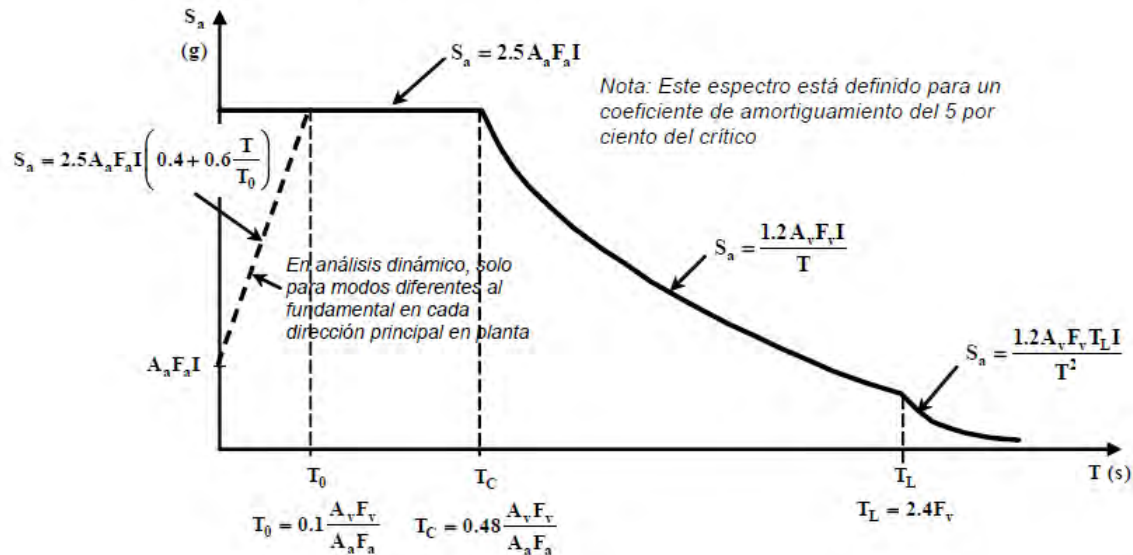


Figura 197: Espectro elástico de aceleraciones en superficie, amortiguamiento del 5 % (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010)

$$A_{max} = A_a \cdot F_a \cdot I \quad (12.12)$$

$$A_{max} = 0,25 \cdot 1,14 \cdot 1,0 = 0,285$$

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 Dabeiba $A_a = 0,25$ (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 C). Se estima un coeficiente de amplificación $F_a = 1,14$ para las condiciones obtenidas (Figura. 198).
- 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).

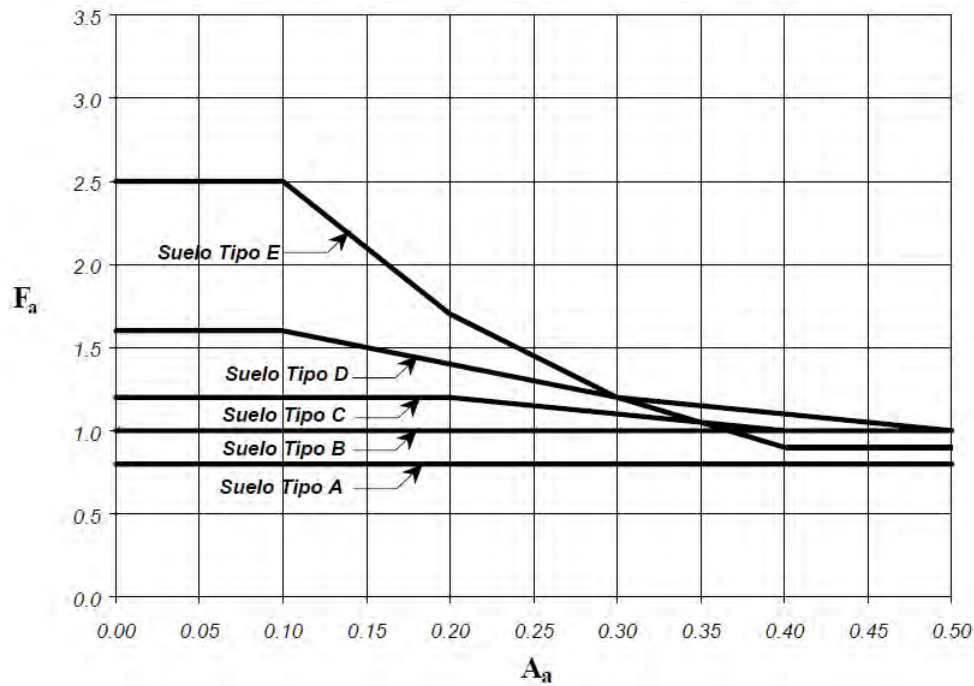


Figura 198: Coeficiente de amplificación F_a del suelos para periodos cortos del espectro (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010)

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 ($RQD < 50\%$)”.

$$K_{ST} = K_{eq} = 0,80 \cdot A_{max} \quad (12.13)$$

$$K_{ST} = K_{eq} = 0,80 \cdot 0,285 = 0,23$$

Se obtiene un valor para el coeficiente pseudoestático $K_{eq} = 0,23$ el cual es usado para el análisis sísmico en Scoops3D para la fuerza horizontal ($k_{eq} \cdot W_{i,j} = 0,23 \cdot W_{i,j}$).

12.6.3. Resultados.

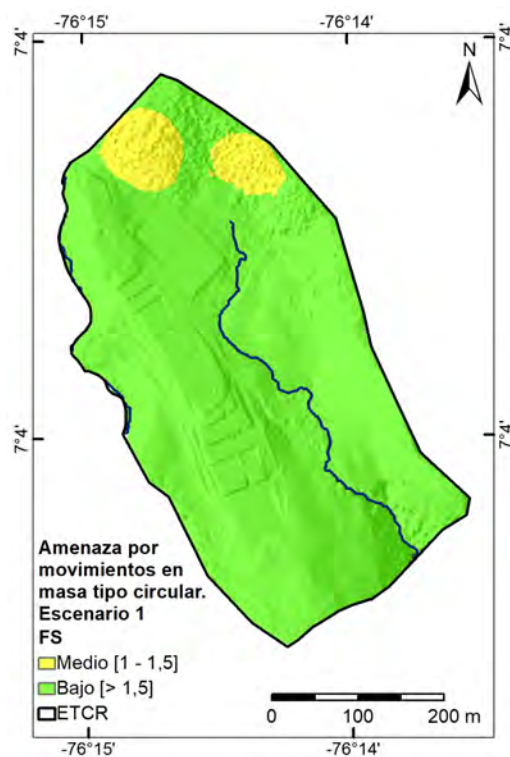
En la Figura 199 se presentan los resultados para 4 escenarios evaluados en Scoops3D; en dos de ellos se considera la fuerza sísmica. Escenario 1: estado seco, Escenario 2: estado seco con análisis sísmico, Escenario 3: nivel freático alto (6m), Escenario 4: nivel freático alto con análisis sísmico.

Tabla 77: Porcentaje de área de FS por escenario evaluado

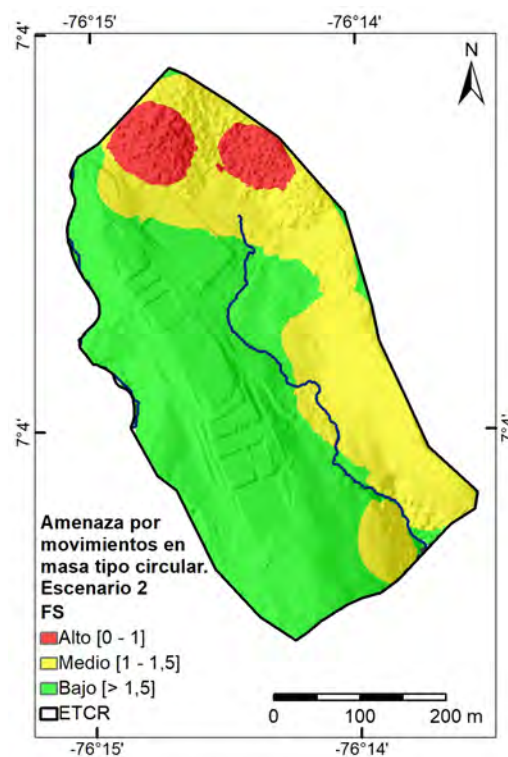
FS	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
$0 - 1$	0,0 %	7,1 %	4,1 %	31,4 %
$1 - 1,5$	6,6 %	35,1 %	26,8 %	16,7 %
$> 1,5$	93,4 %	57,8 %	69,1 %	51,9 %

En el escenario 1 no actúan fuerzas externas y el terreno se encuentra en estado seco, se evidencia un área (6,6 %) con FS entre 1 y 1,5 en el área boscosa del norte. Al aplicar una fuerza sísmica con $k_{eq} = 0,23$ en estado seco (escenario 2), las zonas con $FS > 1,5$ se reducen del 93,4 % al 57,8 %, aumentan en la zona Este FS entre 1 y 1,5 hasta un 35,1 % y surgen áreas con $FS < 1$ en la zona Norte que representan el 7,1 % del antiguo ETCR.

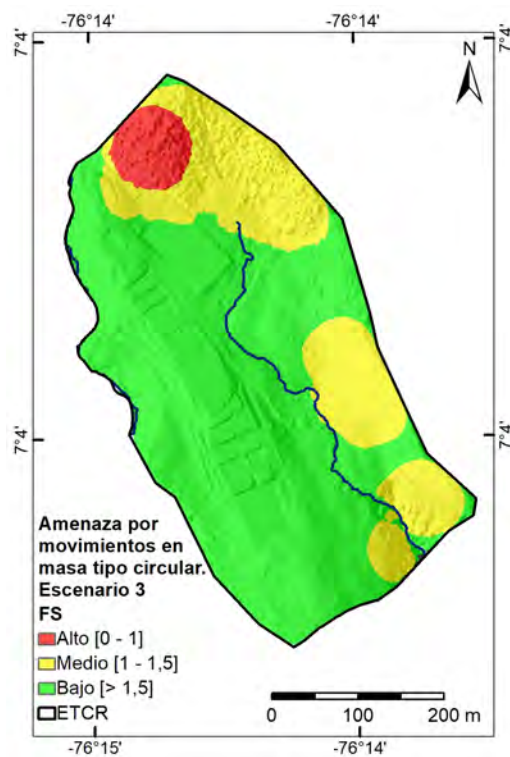
En el escenario 3 el análisis se efectúa con un nivel de agua alto sin fuerzas externas, las áreas con FS entre 1 y 1,5 se presentan al Este, aumentando en un 20,1 % respecto al escenario 1. Finalmente, en el escenario 4 se presenta la condición más desfavorable en la que se evalúa la amenaza durante un evento sísmico con un nivel alto de agua, el área con $FS < 1$ alcanza un 31,4 % y las áreas con $FS > 1,5$ representan el 51,9 %; se evidencia la fuerte influencia de la fuerza sísmica en los escenarios 2 y 4 en la zona Este.



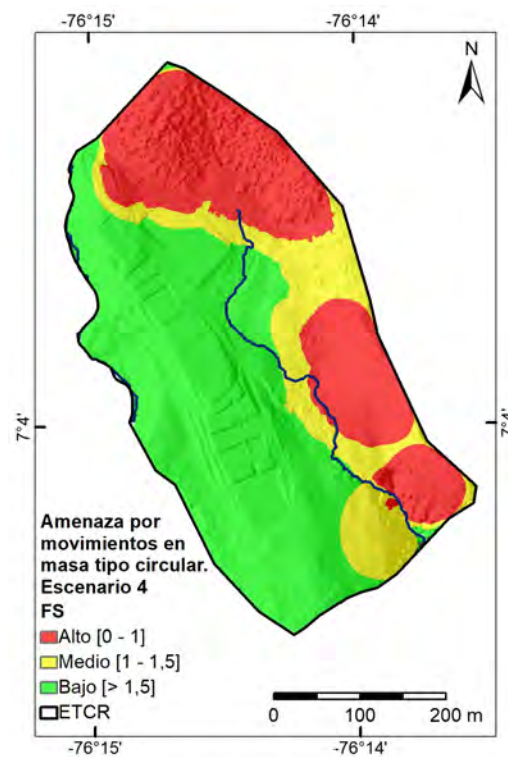
(a) Escenario 1



(b) Escenario 2



(c) Escenario 3



(d) Escenario 4

Figura 199: Amenaza por movimientos en masa tipo circular

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 200).

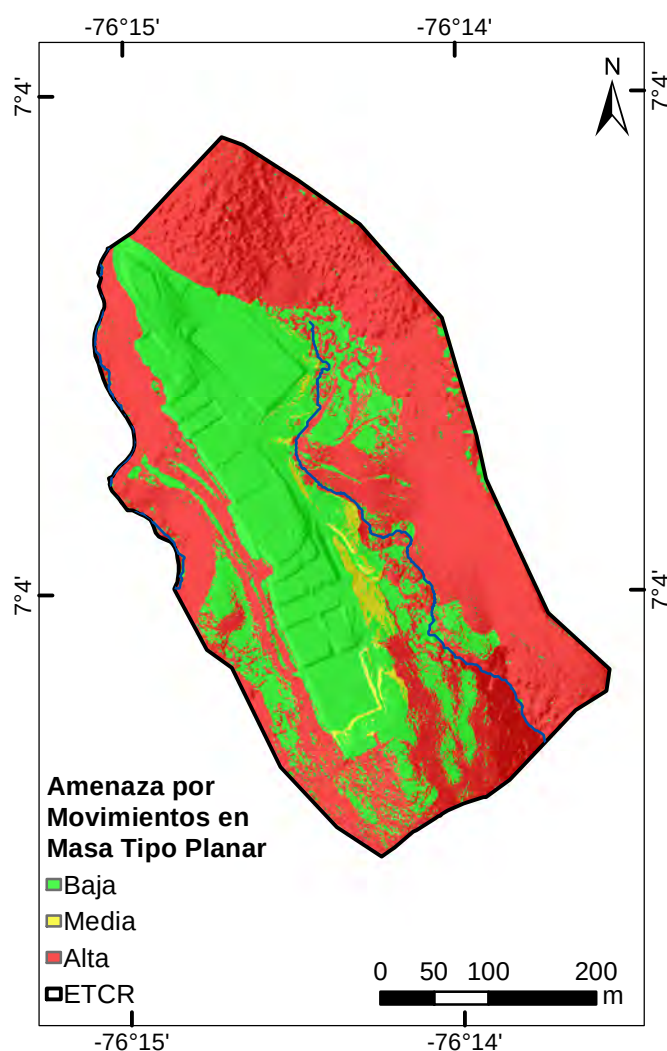


Figura 200: Amenaza por movimientos en masa tipo planar

- 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 201). 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.

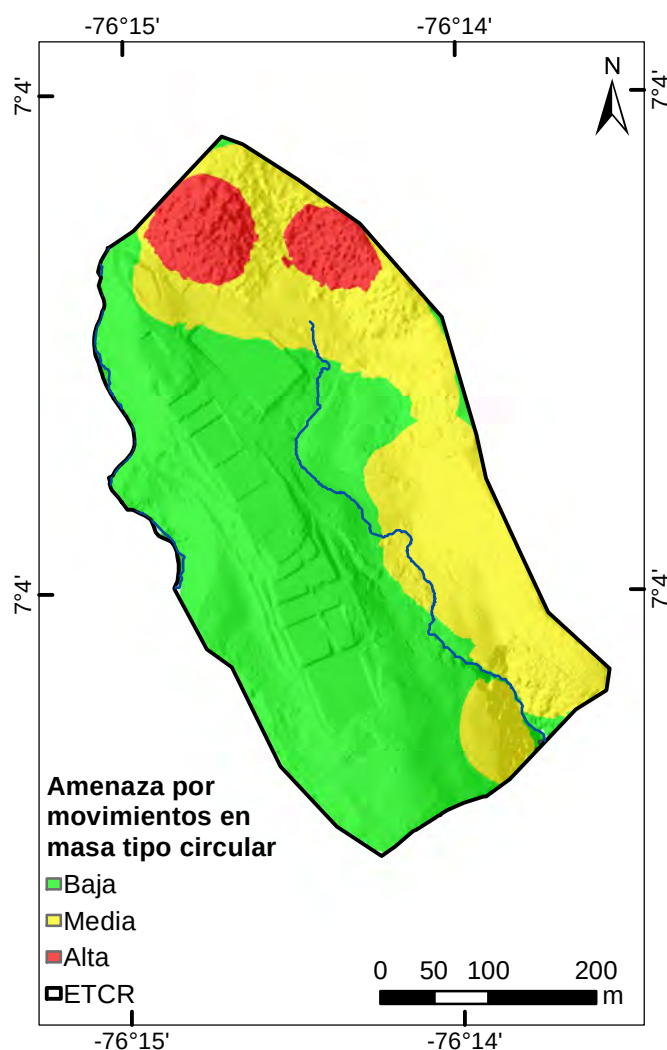


Figura 201: Amenaza por movimientos en masa tipo circular

- Teniendo en cuenta las recomendaciones del Decreto 1807 del 2014, el cual 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 202).

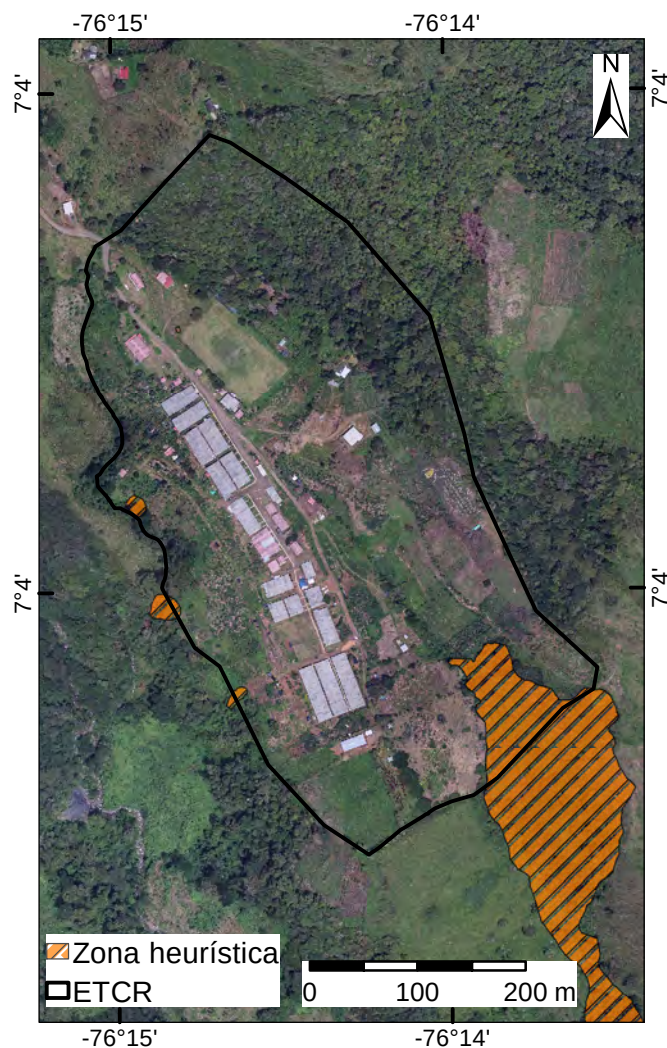


Figura 202: Ajuste heurístico

- 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 203.

En La Tabla 78 se presenta el porcentaje general de cada categoría de amenaza.

Tabla 78: Porcentaje de mapa de amenaza por movimientos en masa

<i>Categoría</i>	<i>%</i>
Baja	31,6
Media	8,1
Alta	60,3

Se resalta que la amenaza de clase alta supera en casi el doble al área con

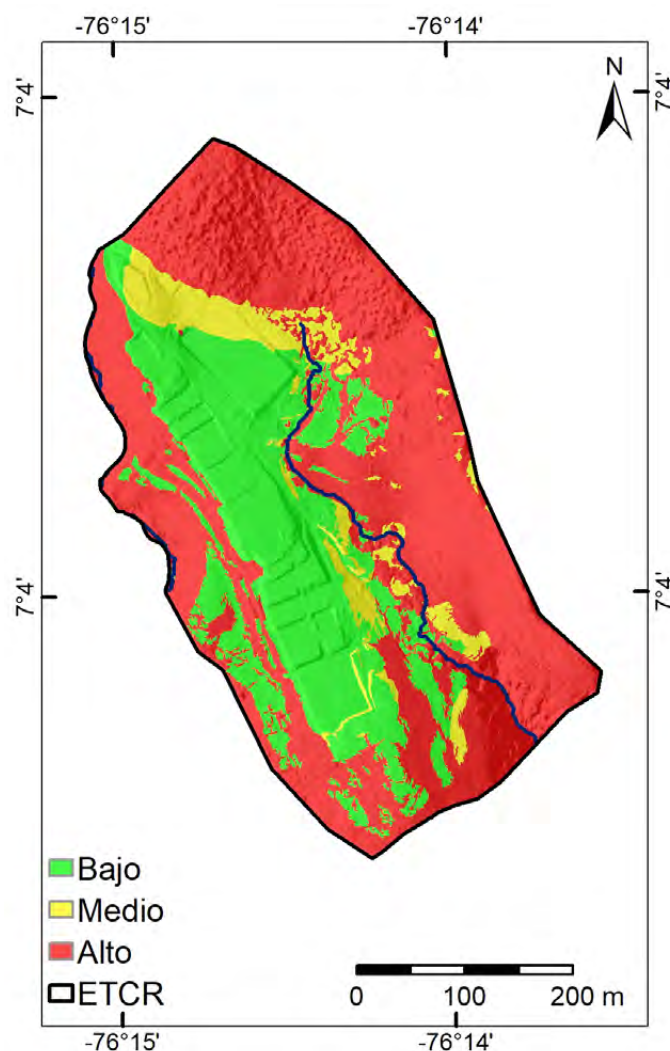


Figura 203: Amenaza por movimientos en masa

amenaza baja, esto como resultado de la localización del predio rodeado por el oeste, este y sur de vertientes con pendientes hasta llegar al grado de escarpe, por ejemplo, al sur del polígono donde el lecho del pequeño cauce con nacimiento en el polígono, se convierte en cañón.

La amenaza media se distribuye sobre zonas de menor pendiente como lo son algunas laderas de las componentes Momxp y pequeños taludes al norte y este de la cancha de fútbol, así como en los alrededores de las piscícolas. Hacia el sur cubren parte del lleno antrópico removido.

La amenaza baja cubre las zonas con la pendiente más baja, que corresponde principalmente a las superficies de explanación, donde actualmente se encuentran los módulos de viviendas de la comunidad. También sobre la ladera oeste, se observa un espacio con este tipo de amenaza, lugar sobre el cual se encuentra

actualmente la PTAR y algunos gallineros.

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 previstos para el antiguo ETCR Llano Grande.

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 204.

Para definir los cortes que fueron tenidos en cuenta para el desarrollo general del análisis de estabilidad se generaron perfiles topográficos por medio de Arc-Map y con la ayuda del programa de diseño AutoCAD, teniendo en cuenta las características de forma del terreno y los cambios de pendiente existentes a lo largo del corte correspondiente. Posteriormente, para el análisis de estabilidad en cada unidad de ladera de interés se evaluaron cuatro escenarios diferenciados por el tipo de falla (circular o no circular) en condiciones estáticas (sin influencia de un sismo) y condiciones pseudoestáticas (con influencia de un sismo).

Para cada escenario se ejecutó un análisis probabilístico utilizando como parámetro variable el nivel freático con una distribución normal. Lo que permite al software analizar la influencia de las variaciones del nivel freático. Por otro lado, se ingresaron los datos estadísticos correspondientes a los parámetros geotécnicos de los materiales encontrados en las perforaciones, teniendo en cuenta la media, y un coeficiente de variación de 40 %, 10 % y 3 % para los 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

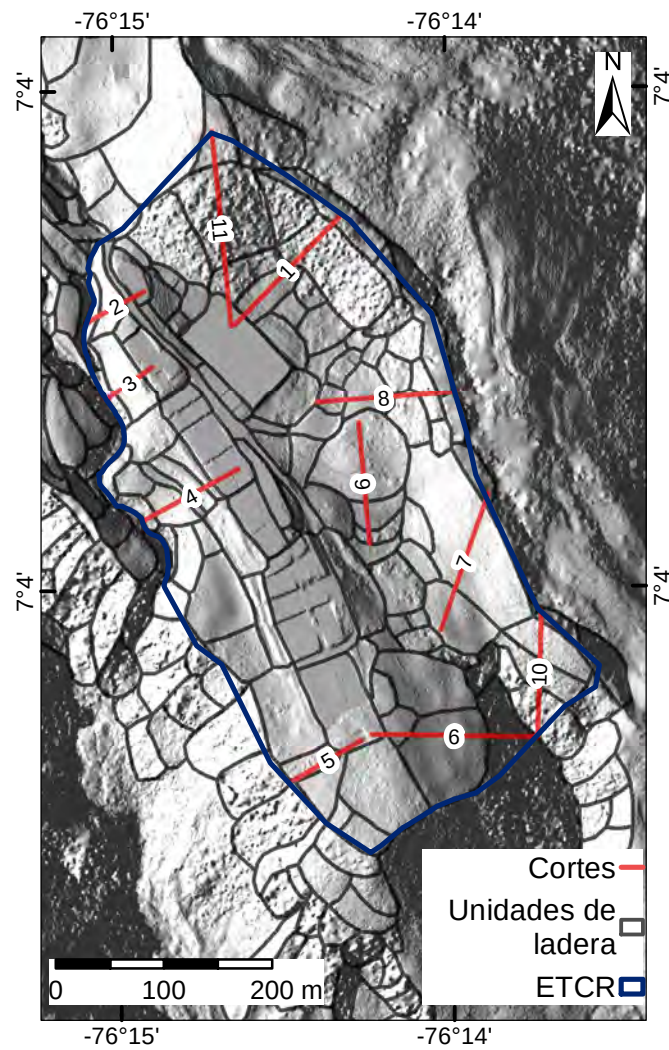


Figura 204: Mapa de las unidades de ladera y los cortes realizados para el antiguo ETCR Llano Grande.

interpretaciones para cada corte, además de las recomendaciones en caso de que se requieran obras de remediación.

12.8.1. Análisis de estabilidad para el corte C1

A partir del corte C1 se construyó el perfil correspondiente, el cual alcanza una longitud aproximada de 130m, buscando analizar la zona previamente definida como objeto de estudio, en la cual se tuvo en cuenta la geología de la zona, además de 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 un esquisto.

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 79, muestran un factor de seguridad mínimo de 0,91, para los escenarios pseudoestáticos y factor de seguridad mínimo de 1,41 con probabilidad de falla de 0 % para los escenarios estáticos, lo que indica una ladera inestable para ambos escenarios, pues ningún factor de seguridad alcanza el valor adecuado.

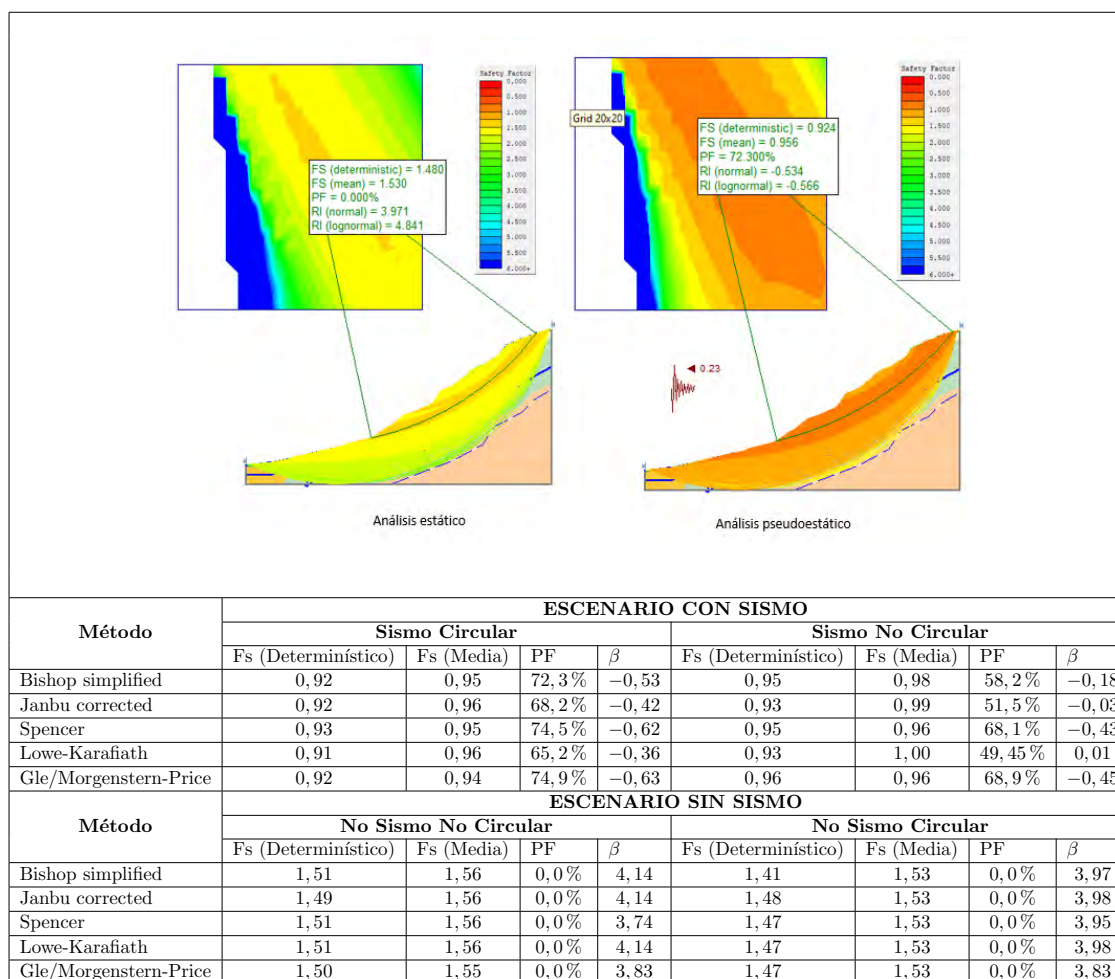
A razón de lo anterior, se entiende que hay que intervenir la ladera, sin embargo la ubicación en la cual se realizó el corte se encuentra en la zona de la declaración de ley segunda, expuesta en el capítulo de viabilidad normativa, considerándose así zona protegida, por tal razón no debe ser intervenida, además en el análisis no se tuvo en cuenta la cohesión que aporta el bosque o la vegetación que allí se encuentra.

12.8.2. Análisis de estabilidad para el corte C2

El corte 2 se realizó debido a los resultados de los software Scoops3D y TRIGRS donde se indica zona de amenaza media y alta respectivamente. Sin embargo los resultados que arroja Slide, los cuales se observan en la tabla 80, muestran un factor de seguridad mínimo de 1,76 con probabilidad de falla de 0 % y β alcanza valores superiores a 4 lo que indica un talud estable.

El corte 2 cuenta con una longitud aproximada de 55 metros y los parámetros de los materiales utilizados para realizar el perfil del corte 2 fueron tomados de los apiques 1 y 6, además de la información utilizada en Scoops3D, en donde se expone un deposito de vertiente para la zona superior de la ladera y en la parte

Tabla 79: Resultados de Slide para C1 y escenario más crítico

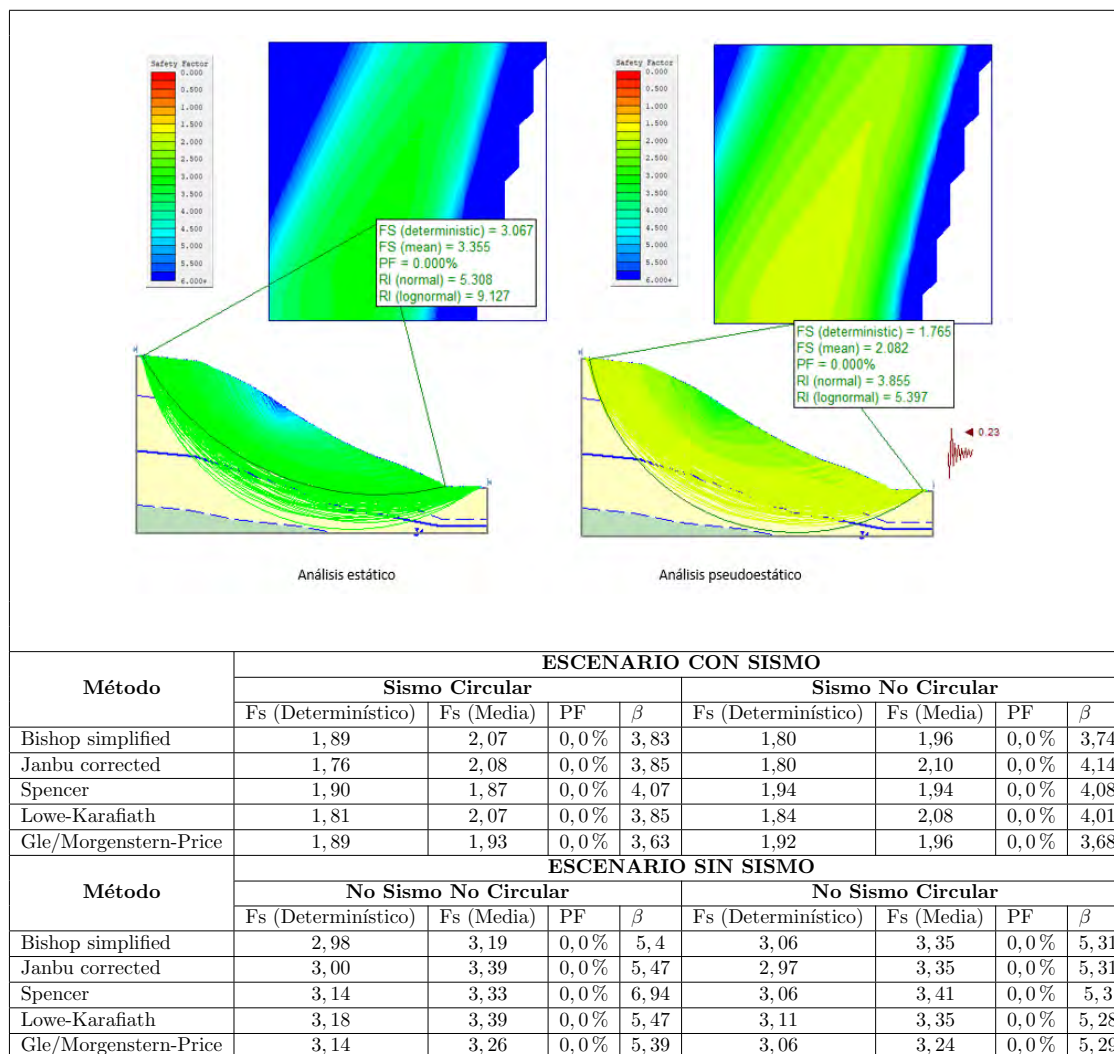


inferior suelo residual, transición suelo roca y roca parcialmente meteorizada.

La Tabla 80 presenta los resultados arrojados por el software Slide de los métodos estadísticos empleados para cada uno de los escenarios propuestos (estático y pseudostático) en el análisis del perfil 2, en la cual se observa para el escenario pseudostático un factor de seguridad adecuado, debido a que estos son mayores a 1,7 y la probabilidad de falla es 0 %. Para los escenarios en condiciones estáticas, se observan factores de seguridad mayores a 2,97 % y la probabilidad de falla es 0 %.

A modo de conclusión para los diferentes escenarios y sus respuestas en cuanto a los métodos estadísticos utilizados en Slide se evidencia factores de seguridad muy superiores a 1,7, lo que indica estabilidad en el talud, por tal motivo no se realizan consideraciones o recomendaciones.

Tabla 80: Resultados de Slide para C2 y escenario más crítico



12.8.3. Análisis de estabilidad para el corte C3

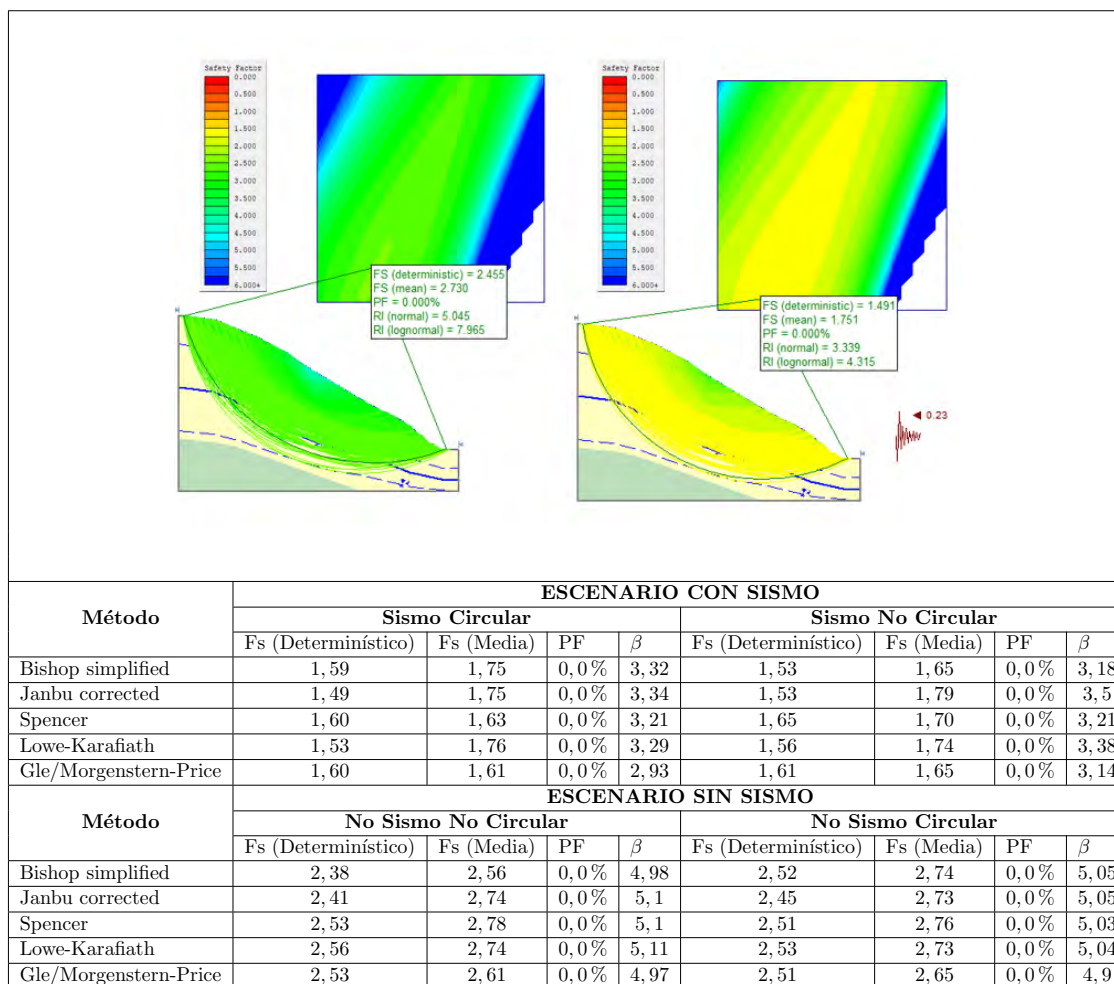
El corte 3 se realizó pensando en la construcción de la planta de tratamiento de agua potable, además del resultado del software TRIGRS donde se indica zona de amenaza alta. El corte 3 alcanza una longitud aproximada de 50m y la información con la cual se realizó el respectivo perfil fue tomada de los PTAP 1, 2 y 3, en donde corresponde a un depósito de vertiente, además se tomó la información utilizada en Scoops3D para las características de la aldera a profundidad y se determinó la presencia de saprolito y esquisto.

En la tabla 81 se exponen los resultados obtenidos por el software Slide en diferentes escenarios y haciendo uso de diferentes métodos estadísticos, donde se puede observar que el factor de seguridad es adecuado, lo que indica que no

existe una condición crítica actual.

A modo de conclusión para los diferentes escenarios y sus respuestas en cuanto a los métodos estadísticos utilizados en Slide se evidencia factores de seguridad muy superiores a 1,5, lo que indica estabilidad en la ladera, por tal motivo no se realizan consideraciones o recomendaciones.

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



12.8.4. Análisis de estabilidad para el corte C4

Por medio del corte C4 se realizó el perfil para el cual se tomaron los parámetros geotécnicos obtenidos por la perforación P5, ubicada 15m al sur de la parte alta de la ladera analizada. Para la perforación P5 se tiene una descripción del material como un depósito de vertiente, con predominancia de limos (70 %) con ligera presencia de humedad. Los ensayos de laboratorio correspondientes se realizaron en un único material, para el cual se incluyen los parámetros

geotécnicos en el software Slide, como parte del primer horizonte de suelo, hasta los 3m de profundidad registrados en la perforación y material analizado. Para los siguientes horizontes de suelo se tomaron los datos de la parametrización geotécnica, realizada a partir de la geología superficial y aplicada para el modelo Scoops3D, de donde se utilizaron los parámetros registrados para los horizontes de suelo de la zona 2, en la cual se ubica el corte espacialmente.

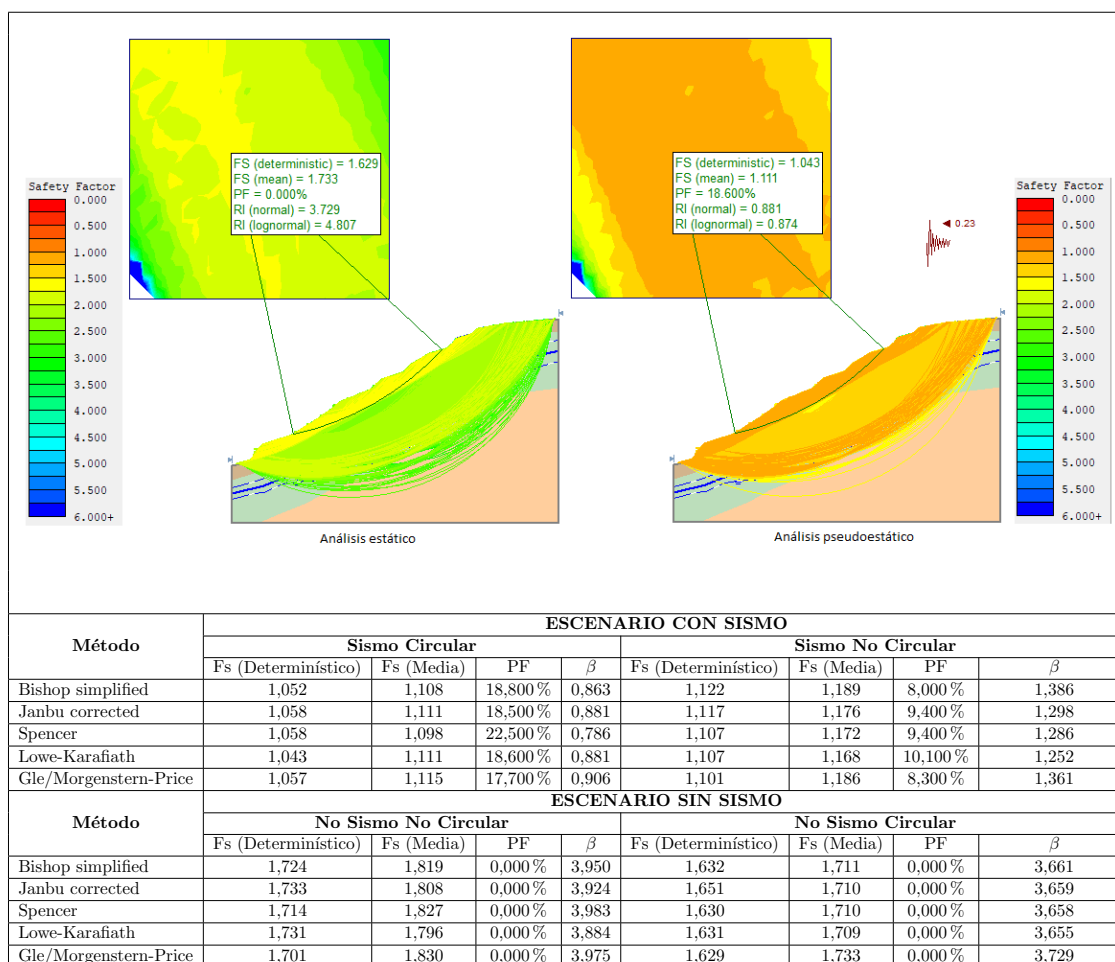
Según el mapa de amenaza resultante de TRIGRS, la zona se encuentra en un gran polígono de amenaza alta, mientras que en Scoops3D se define como de amenaza baja. La modelación de los diferentes escenarios y el análisis de los métodos estudiados mediante el software Slide, permiten entender la zona analizada como de amenaza media, teniendo en cuenta que para escenarios pseudoestáticos se obtienen FS mayores a 1,05, pero asociados a PF de hasta el 22,5 % y β inferior a 1. De igual forma, para condiciones estáticas el FS es mínimo de 1,63 específicamente para tipo de falla circular, lo cual sumado a los resultados en condiciones pseudoestáticas, no permite asociar la zona a una amenaza baja (ver Tabla 82).

Partiendo de la probabilidad de falla mayor al 16 % en escenarios con influencia de movimientos sísmicos y el factor de seguridad tan bajo arrojado para escenarios estáticos, se procedió a realizar la modelación correspondiente al escenario más crítico (sismo circular) con variaciones en la altitud del nivel freático, en donde se encontró que si se reduce en al menos 10m, se mejoran las condiciones de estabilidad, lo cual se evidencia en el cambio en el FS de 1,043 para el talud sin intervenir, a 1,3 para el talud con el nivel freático reducido, de igual forma la PF se reduce hasta el 0 % y se obtienen índices de confiabilidad (β) mayores a 50, incluso en el peor de los escenarios, como se observa en la Figura 205. Por esta razón se recomienda la instalación de un Sistema de filtros o drenajes superficiales o subsuperficiales, que permitan la evacuación del recurso hídrico preferiblemente a 10m del punto mas bajo del talud evaluado, para dar lugar a una reducción de 10m al nivel freático original y poder considerar la zona como estable según los resultados arrojados por el software Slide.

12.8.5. Análisis de estabilidad para el corte C5

Para el análisis de la zona representada por medio del corte C5 se tomaron los parámetros geotécnicos obtenidos por la perforación P1, ubicada 36m al sur de la parte alta del perfil correspondiente. Para dicha perforación se identifica el material como un saprolito húmedo, con abundancia de arcillas, plasticidad

Tabla 82: Resultados de Slide para C4 y escenario más crítico con sismo y sin sismo.



alta, consistencia media y con cierto grado de meteorización. Los ensayos de laboratorio fueron realizados a dos muestras extraídas a diferentes profundidades, para las cuales se incluyeron los parámetros geotécnicos requeridos en el software Slide, como parte del primer horizonte 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.

Para el modelo de TRIGRS, el área en la que se encuentra C5 corresponde a una amenaza alta predominante, en contraste con los resultados arrojados por Scoops3D, en los que se identifica una extensa área de amenaza baja. En general, los resultados obtenidos por Slide indican que la zona se encuentra estable para todos los escenarios y metodologías analizados, esto se ve reflejado en la

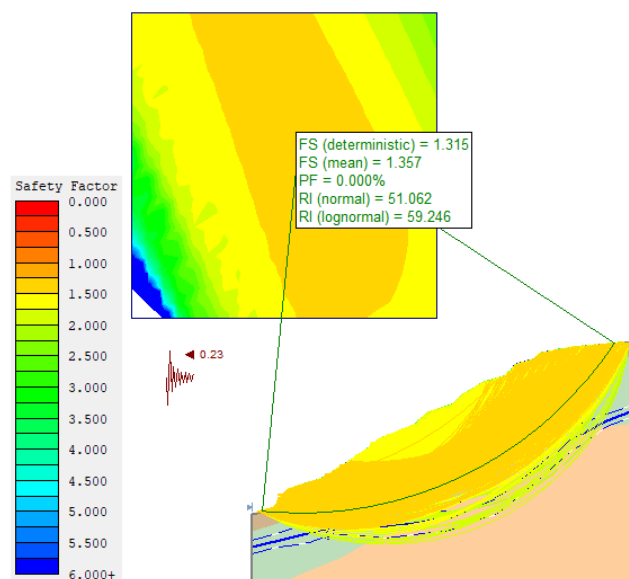


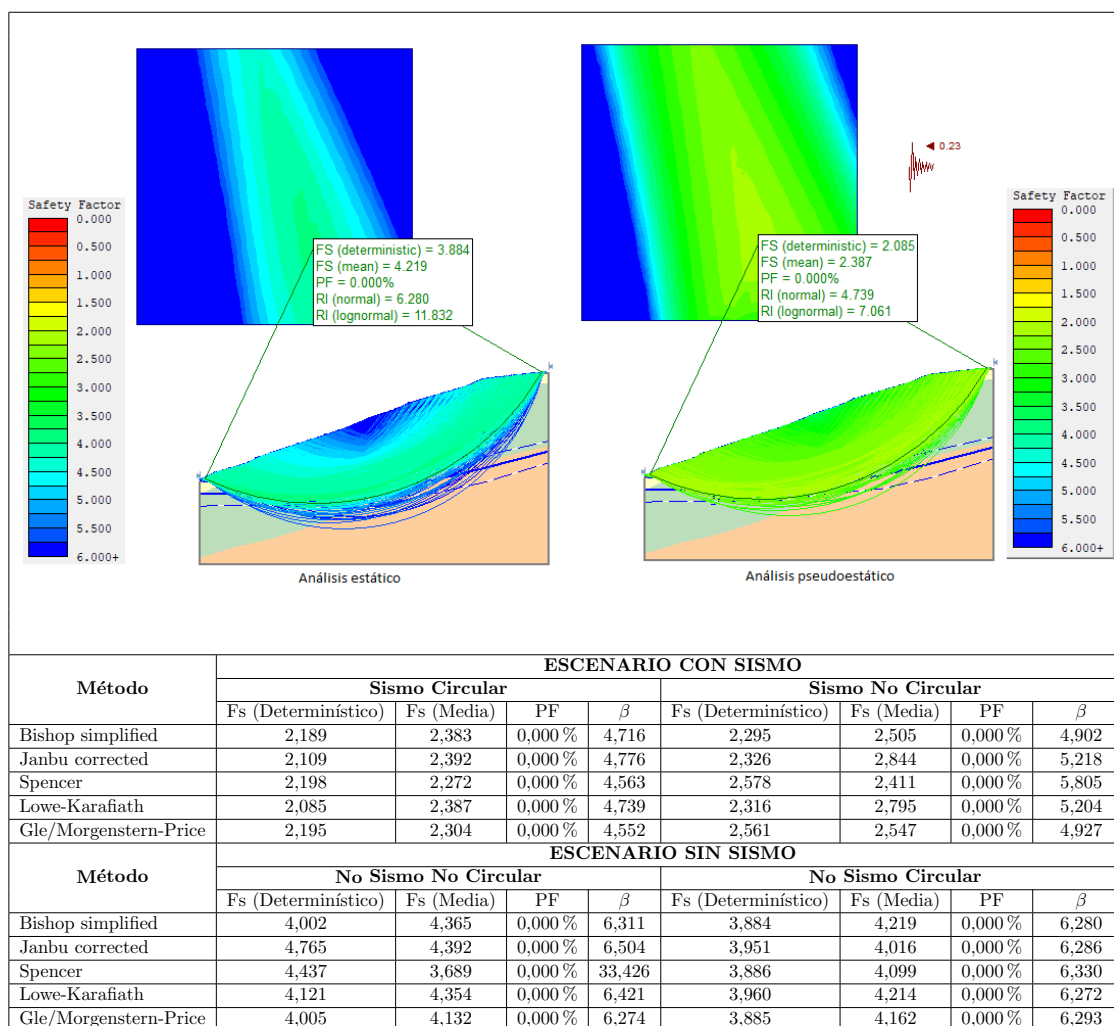
Figura 205: Perfil del corte C4 en escenario más crítico (sismo circular) con disminución del nivel freático.

obtención de FS mayores a 2 en condiciones pseudoestáticas y mayores a 3,8 para escenarios estáticos, adicionalmente las PF son siempre del 0 % (ver Tabla 83). Teniendo en cuenta lo anterior, la zona estudiada puede considerarse estable según el análisis mediante Slide, por lo cual no es necesaria la recomendación de obras de remediación en el talud.

12.8.6. Análisis de estabilidad para el corte C6

Para el corte C6 se realizó el perfil cuyos parámetros geotécnicos fueron obtenidos por la perforación P1, ubicada 48m al sur de la parte alta de la ladera analizada. Para esta perforación se describe el material como un saprolito húmedo, con abundancia de arcillas, plasticidad alta, consistencia media y con cierto grado de meteorización. Posteriormente se extrajeron dos muestras de distintas profundidades, que fueron utilizadas en los ensayos de laboratorio correspondientes de donde se toman los parámetros requeridos para la modelación mediante el software Slide, como parte del primer horizonte 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.

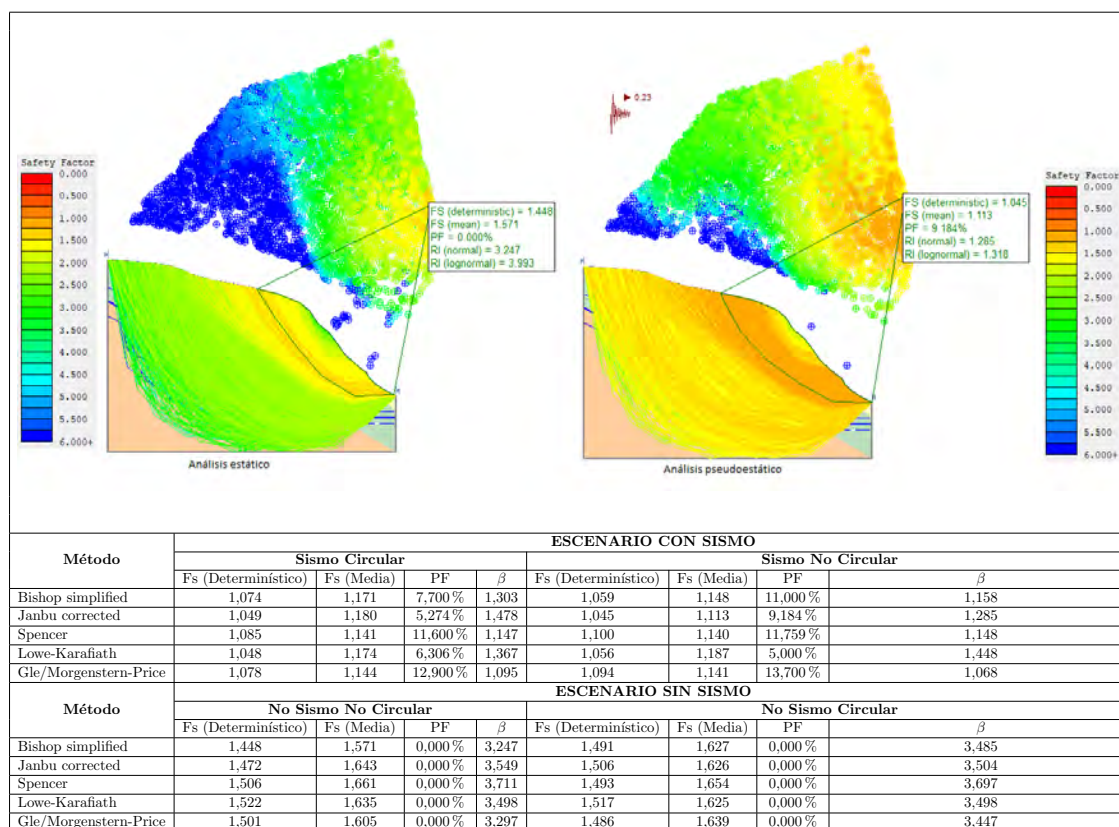
Tabla 83: Resultados de Slide para C5 y escenario más crítico con sismo y sin sismo.



Teniendo en cuenta los resultados arrojados por el modelo TRIGRS, la zona se encuentra asociada a múltiples manchas de amenaza alta a lo largo del corte, mientras que, según Scoops3D el corte está inmerso en una zona identificada como de amenaza baja, con una porción en la zona de mayor pendiente, al final del perfil, en amenaza media. La modelación por medio del software Slide para los diferentes escenarios y metodologías estudiadas permiten entender la zona como de amenaza media, ya que se tienen PF inferiores al 13 % pero asociados a FS que en algunos casos son menores a 1,05 para condiciones pseudoestáticas y menores a 1,5 en escenarios estáticos (ver Tabla 84).

Considerando los resultados obtenidos para todos los escenarios y partiendo de las probabilidades de falla obtenidas para el peor escenario, se recomendaría una intervención en la zona de mayor pendiente del perfil, justo del medio hacia abajo, ya que es allí en donde se generan las principales superficies de

Tabla 84: Resultados de Slide para C6 y escenario más crítico con sismo y sin sismo.



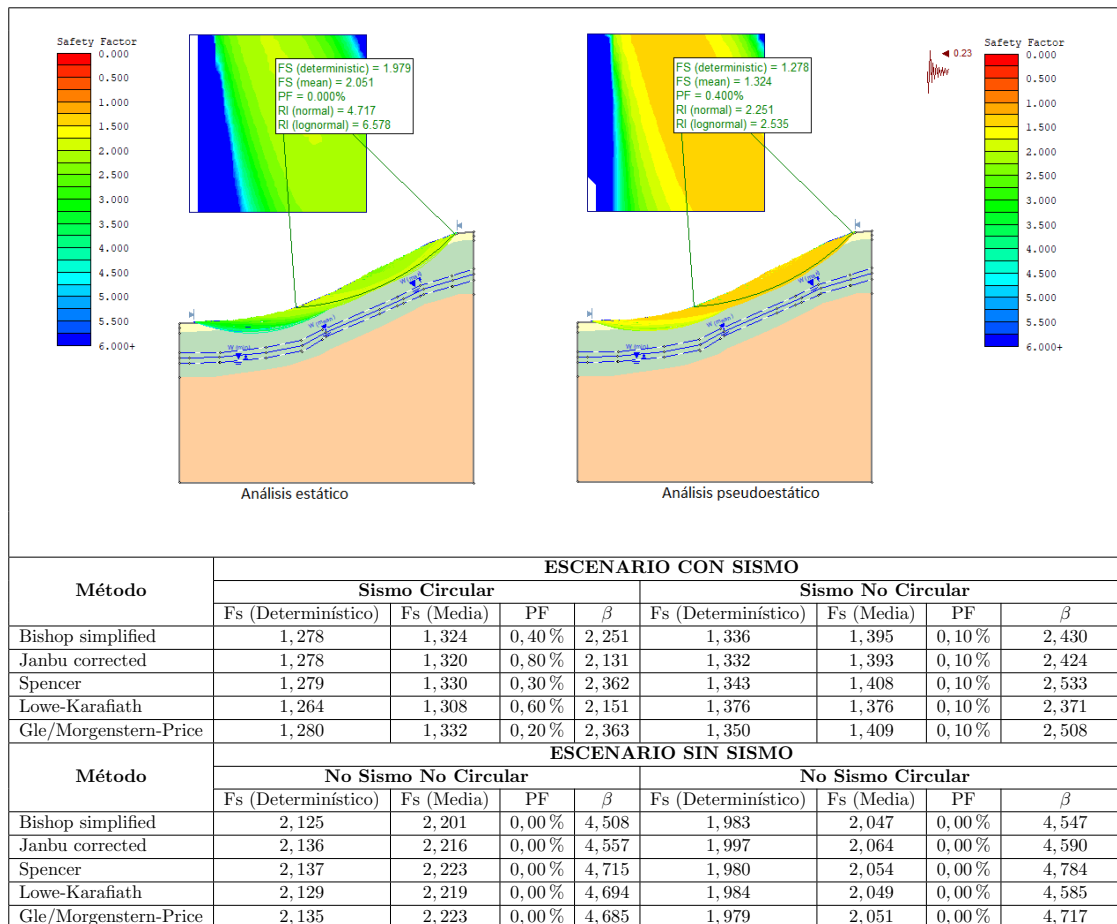
falla, lo cual puede estar muy asociado a la alta pendiente del talud en esa zona en específico. Sin embargo, por medio de la interpretación de la imagen satelital disponible y la información recolectada en la visita al antiguo ETCR Llano Grande, se evidencia que justo la zona de mayor pendiente del perfil se encuentra cubierta por bosque, lo cual no permite realizar recomendaciones para intervenir el talud, debido a que la implementación de cualquier obra tendría un impacto sobre la cobertura vegetal de la zona y se afectaría el equilibrio de fuerzas presente en el suelo, el cual no es considerado por el análisis (2D) de Slide.

12.8.7. 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 y el apique 3. En estos ensayos fueron encontrados dos materiales, para el apique se tiene una grava limosa de color café compuesto por gravas (48, 8 %), arena (9, 8 %) y finos (41, 1 %); para la perforación se encontró

una grava limosa con arena de color café, con pocas variaciones porcentuales en los materiales encontrados en el apique 3. 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 zona es de amenaza 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.

Tabla 85: Resultados de Slide para C7 y escenarios más critico



Los resultados arrojados por el software Slide para un escenario con sismo determinó que sin importar el modo en que la ladera podría fallar, esta es estable, debido al factor de seguridad mayor a 1,05. En cuanto a la probabilidad de falla para este escenario, en un tipo de falla circular este ronda 0,5 % y el índice de confiabilidad se ubica por encima de 4,508, determinando que la ladera presenta un nivel de amenaza baja en un escenario pseudoestático. Para el segundo escenario evaluado, es decir sin sismo, el factor de seguridad cumple para ambos modos de falla en la ladera. El método *Bishops simplified* arrojó

el valor mínimo en el (F_s) de 1,983, una probabilidad de falla del 0 % y un índice de confiabilidad (β) de 4,547, estableciendo para el escenario estático una estabilidad en la ladera perteneciente al corte C8. Dado estos resultados, no es necesario la intervención con obras de mitigación en este sector del antiguo ETCR.

12.8.8. Análisis de estabilidad para el corte C8

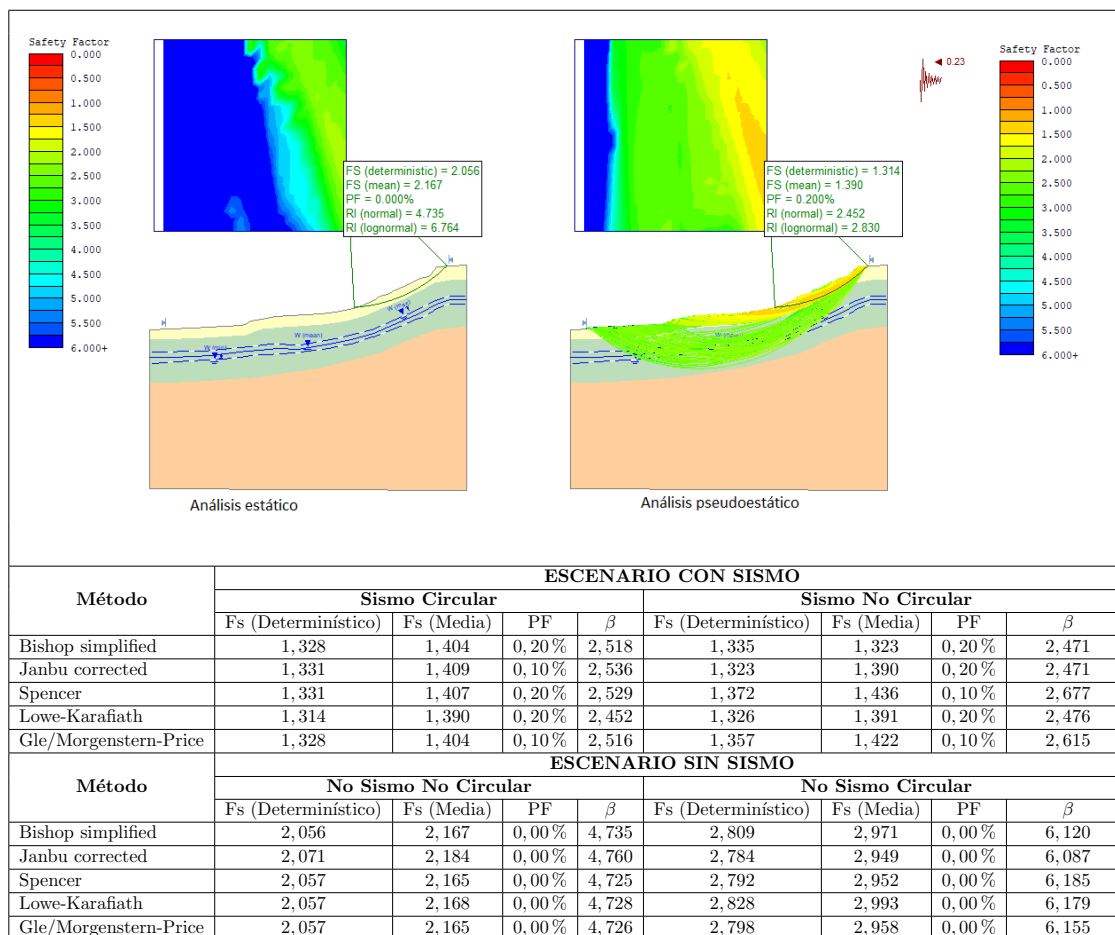
Sobre la base de los resultados obtenidos en Scoops3D y TRIGRS donde indican un nivel de amenaza para la ladera norte del antiguo ETCR se realizó el corte C8 para determinar el grado de estabilidad en la zona y determinar las posibles obras de mitigación en la zona. Los parámetros geotécnicos obtenidos para la construcción del perfil se tomaron de la perforación 4 y el apique 1, en ambos ensayos se encontró un material de tipo grava limosa de color café compuesto por gravas (48,8 %), arena (9,8 %) y finos (41,1 %); adicionalmente fueron tomados para las capas más profundas los materiales usados en Scoops3D pertenecientes a las Zona 4, donde se tiene un deposito de vertientes y la roca metamórfica de tipo esquisto. Con las anteriores consideraciones se obtuvieron los siguientes resultados.

Los resultados obtenidos en un escenario sin sismo en la ladera muestran un valor alto para el factor de seguridad (mayor a 2,056) para un tipo de falla circular y en todos los métodos evaluados la probabilidad de falla es inferior al 0,001 %, esto refleja en general que la ladera es estable y que solo en el tramo superior, es decir, con el aumento en la pendiente se tienen los valores menores al índice de confiabilidad (2,471) reflejando el nivel de amenaza baja para un escenario estático. Por otra parte, los resultados para un escenario sísmico con coeficiente de (0,23) evidencian una estabilidad completa en la ladera. Al igual que en el escenario estático, solo en el tramo superior se tienen los valores menores en el factor de seguridad (1,314), con probabilidades de falla del 0,2 %; sin embargo estos se ajustan correctamente a la norma. En conclusión, según los resultados obtenidos para ambos escenarios en el corte 8, se establece un grado de amenaza baja y no es necesario algún tipo de intervención u obra de estabilización en la ladera.

12.8.9. Análisis de estabilidad para el corte C9

Debido a los resultados obtenidos en Scoops3D y TRIGRS sobre una ladera de pendiente media que indican un grado de amenaza alta, se realizó el corte

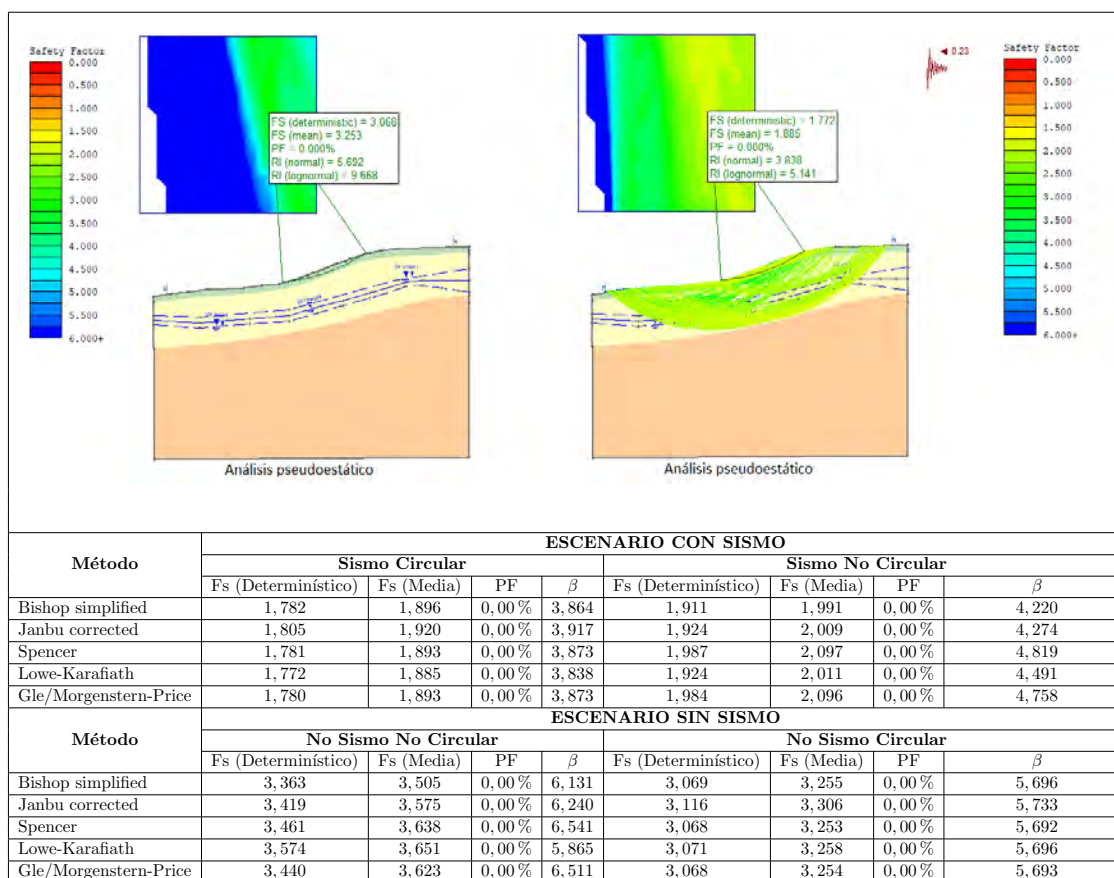
Tabla 86: Resultados de Slide para C8 y escenario más crítico



C9 con el objetivo de determinar la estabilidad del terreno en esa zona. Para dicha construcción se tomaron los parámetros geotécnicos de la perforación 4 y el apique 3, en estos se encontró un material gravo-limoso de color café compuesto por gravas (48,8 %), arena (9,8 %) y finos (41,1 %). De igual manera fueron tomados para las capas más profundas del perfil los materiales usados en Scoops3D pertenecientes a las Zona 4, donde se tiene un depósito de vertientes y la roca metamórfica de tipo esquisto. Con las anteriores consideraciones se obtuvieron los siguientes resultados.

Los resultados obtenidos por el software Slide para un escenario con sismo muestran que sin importar el modo de falla ocurrida en la ladera, los factores de seguridad son superiores a 1,05. La Tabla 87 indica que en un análisis pseudostático el factor de seguridad para el método *Lowe-karafiath* es de 1,772, teniendo una probabilidad de falla del 0 % y un índice de confiabilidad mayor a 3,838. En el análisis estático, los resultados obtenidos cumplen claramente

Tabla 87: Resultados de Slide para C9 y escenarios más critico

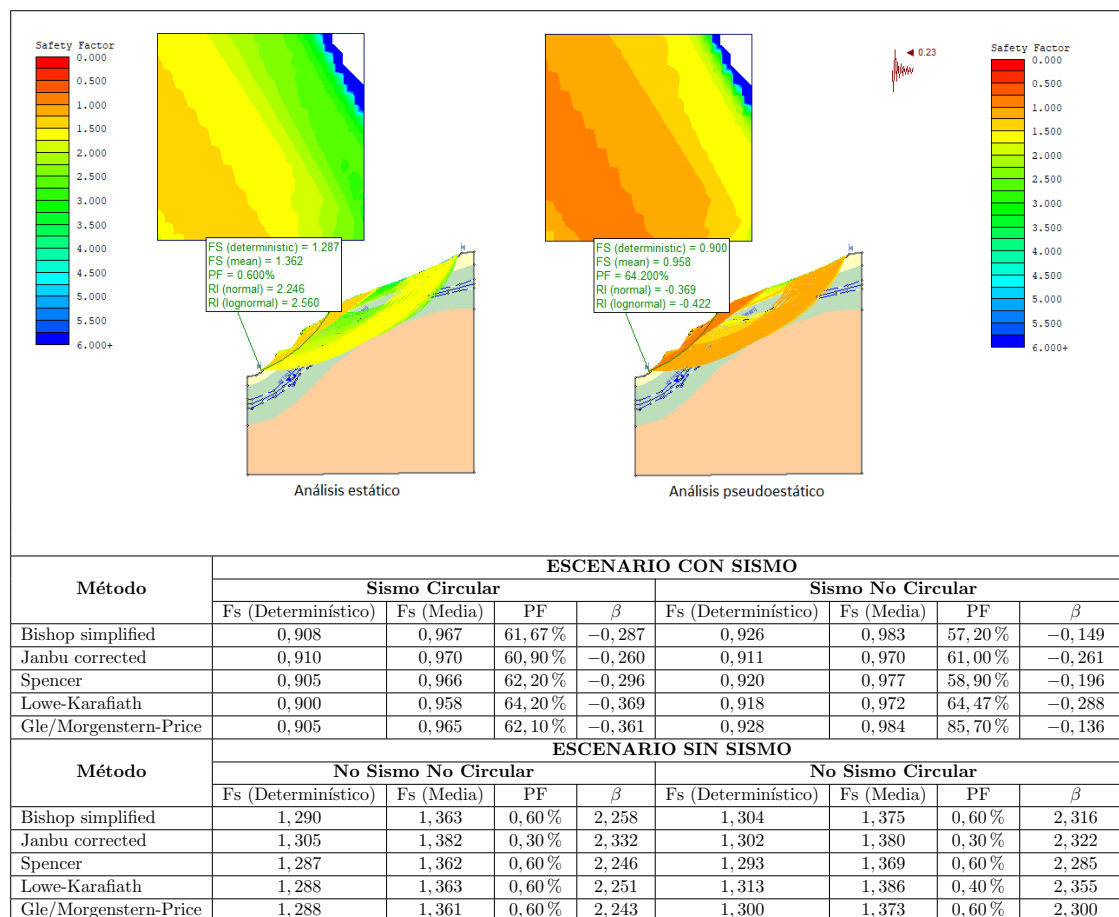


con la norma, puesto que el factor de seguridad en general es mayor a 3,069 y el índice de confiabilidad es mayor a 5,696. En general la ladera presenta un grado de estabilidad alta y con esto un nivel de amenaza baja para toda la Zona 4 del antiguo ETCR, esto hace evidente la no intervención con obras de estabilización o mitigación en este sector.

12.8.10. Análisis de estabilidad para el corte C10

A partir del corte C10 se construyó el perfil con longitud aproximada de 100m correspondiente a la zona sureste del antiguo ETCR. Sobre la base de los resultados obtenidos en Scoops3D y TRIGRS que indican un nivel de amenaza alta en la zona se hizo necesario el estudio de la ladera con el objetivo de determinar su estabilidad y sus probables obras de contención. De tal manera que con la información obtenida a partir de los ensayos de campo, en este caso de la perforación 3 para la parte superficial del perfil, seguido de un depósito aluvial y una roca metamórfica esquistosa tomada de la información utilizada en Scoops3D se realizó la construcción de dicho perfil, obteniendo los siguientes resultados en Slide.

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



En un escenario sísmico con un coeficiente de 0,23 la ladera se considera de amenaza alta, dado que el factor de seguridad más critico refleja un valor de 0,900 para el método *Lowe karafiath* y una probabilidad de falla superior

al 16 % para un modo de falla circular. En las imágenes de la Tabla 88, el análisis pseudoestático refleja que la inestabilidad de la ladera se encuentra en la parte media de esta y se concentran en la capa compuesta por el depósito aluvial. En un escenario sin sismo, los resultados arrojaron una probabilidad de falla entre 0,3 y 0,6 %, pero con valores en el factor de seguridad que son menores a 1,313 independiente del modo en que falle la ladera, es decir que aunque se considere la zona de amenaza media por su probabilidad de falla, está no cumple con la norma en el factor de seguridad (1,5), por tal motivo es necesario obras de estabilización del talud que permitan aumentar este valor del factor de seguridad para ambos escenarios.

Dado los resultados arrojados por Slide fue necesario implementar sobre la zona inferior de la ladera un sistema de drenes que permitieran abatir el nivel freático buscando aumentar la estabilidad del terreno. Otra obra propuesta sobre la ladera es la perforación y posterior instalación de anclajes en el tramo medio de esta. Con estas obras se consiguió un aumento en el factor de seguridad para el escenario pseudoestático de 1,086 y de 1,623 para el escenario estático, cumpliendo con la norma y estableciendo un nivel de amenaza media en la ladera.

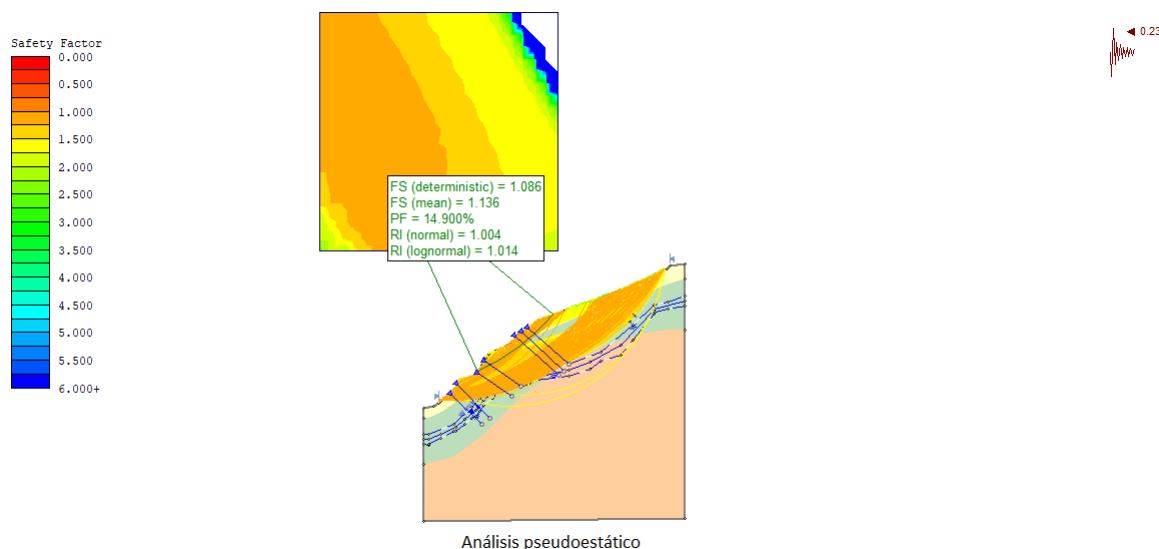


Figura 206: Perfil del corte C10 en escenario más crítico con disminución del nivel freático y anclajes.

12.8.11. Análisis de estabilidad para el corte C11

A partir del corte C11 se construyó el perfil correspondiente, el cual alcanza una longitud aproximada de 180m, buscando analizar la zona previamente

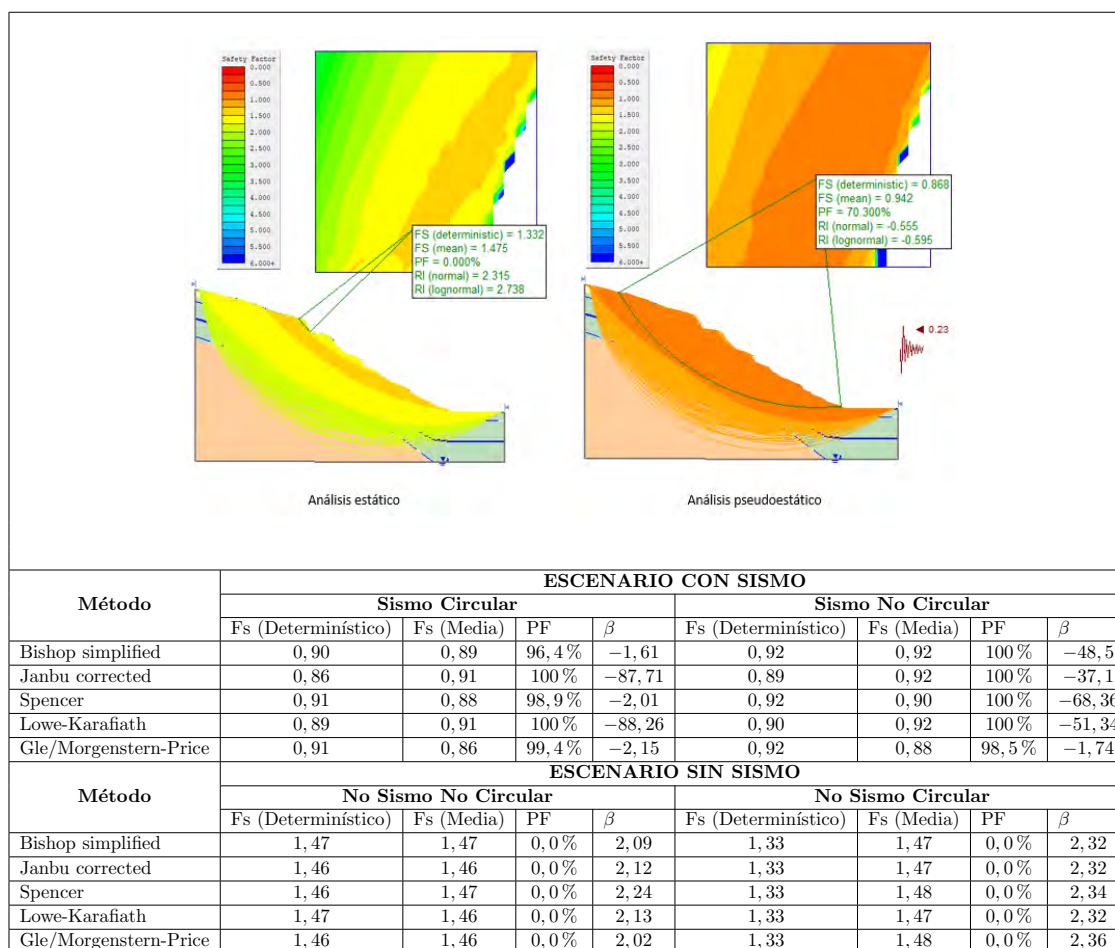
definida como objeto de estudio, en la cual se tuvo en cuenta la geología de la zona, además de la información utilizada en el software Scoops3D.

A razón 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 un esquisto.

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 89, muestran un factor de seguridad mínimo de 0,86, para los escenarios pseudoestáticos y factor de seguridad mínimo de 1,33 con probabilidad de falla de 0% para los escenarios estáticos, lo que indica una ladera inestable para ambos escenarios, pues ningún factor de seguridad alcanza el valor adecuado.

A razón de lo anterior, se entiende que hay que intervenir la ladera, sin embargo la ubicación en la cual se realizó el corte se encuentra en la zona de la declaración de ley segunda, expuesta en el capítulo de viabilidad normativa, considerándose así zona protegida, por tal razón no debe ser intervenida, además en el análisis no se tuvo en cuenta la cohesión que aporta el bosque o la vegetación que allí se encuentra.

Tabla 89: Resultados de Slide para C11 y escenario más critico



12.8.12. Mapa de amenaza por movimiento en masa

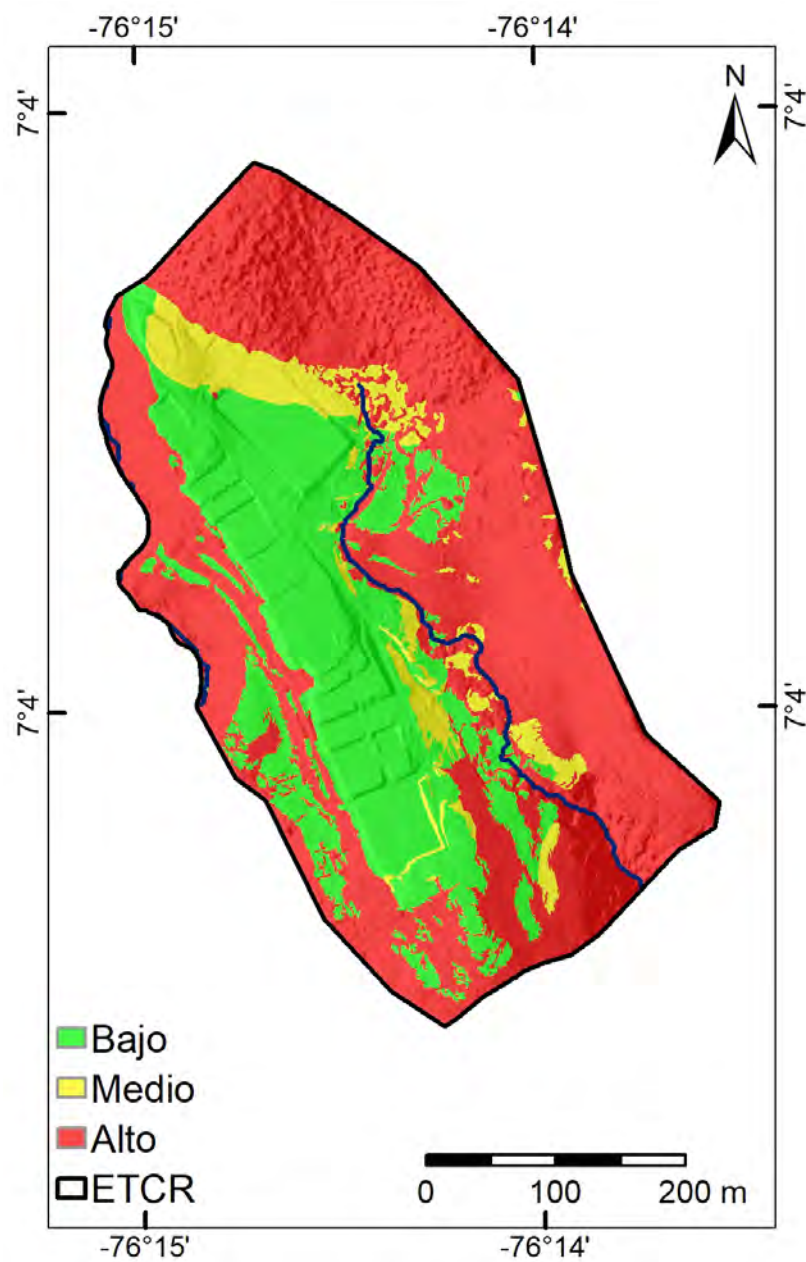


Figura 207: Amenaza por movimientos en masa

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.
- Carvajal, J. (2012). *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia [internet]. Bogotá: Servicio geológico colombiano; 2012. 84 p.*
- 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.
- Lam, L., y Fredlund, D. G. (1993). A general limit equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis. , 30(6), 905–919. doi: 10.1139/t93-089
- Li, A., Yue, Z., Tham, L., Lee, C., y Law, K. (2005, 02). Field-monitored variations of soil moisture and matric suction in a saprolite slope. *Canadian Geotechnical Journal - CAN GEOTECH J*, 42, 13–26. doi: 10.1139/t04-069
- Louie, J. (2001, 04). Faster, better: Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91. doi: 10.1785/0120000098
- Montenegro, L. (2014). Calibración del método de parámetros de resistencia con spt en suelos de la región llanera colombiana. *Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá*.
- Montoya, C. H., y Asis, A. P. D. (2011). Herramientas para análisis por confiabilidad en geotecnia: Aplicación. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 10(18), 69–78.
- Park, C., Miller, R., y Xia, J. (1999, 05). Multichannel analysis of surface waves (masw). *Geophysics*, 64. doi: 10.1190/1.1444590
- Rahardjo, H., Lim, T., Chang, M.-F., y Fredlund, D. (1995, 02). Shear-strength characteristics of a residual soil. *Canadian Geotechnical Journal - CAN GEOTECH J*, 32, 60–77. doi: 10.1139/t95-005
- Reid, M. E., Christian, S., Brien, D., y Henderson, S. (2015). *Scoops3D — Software to Analyze Three-Dimensional Slope Stability Throughout a Digital Landscape*. U.S. Geological Survey. Descargado de <https://pubs.er.usgs.gov/publication/tm14A1> doi: 10.3133/tm14A1
- Richards, L. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1, 318–333.
- Saxton, K., Johnson, H., y Shaw, R. (1974). Modeling evapotranspiration and soil moisture [watershed hydrology]. *Transactions of the ASAE (USA)*.
- SGC. (2012). Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 100.000. *Subdirección de Amenazas Geológicas y Entorno Ambiental*, 88p. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá-Colombia.
- SGC. (2013). *Geología de la Plancha 114 Dabeiba* (Inf. Téc.).
- 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_lRAAAAMAAJ
- 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 Llano Grande a partir de los resultados de simulaciones hidrodinámicas bi-dimensionales 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 208 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 la quebrada Llano Grande, la quebrada El Silencio y los tributarios de la quebrada Chimiadó que influyen en el antiguo ETCR de Llano Grande: NN1 que se encuentra dentro del antiguo espacio territorial y NN2 que se ubica al este por fuera del antiguo espacio territorial. En la Figura 209 se presentan las corrientes del antiguo ETCR Llano Grande.

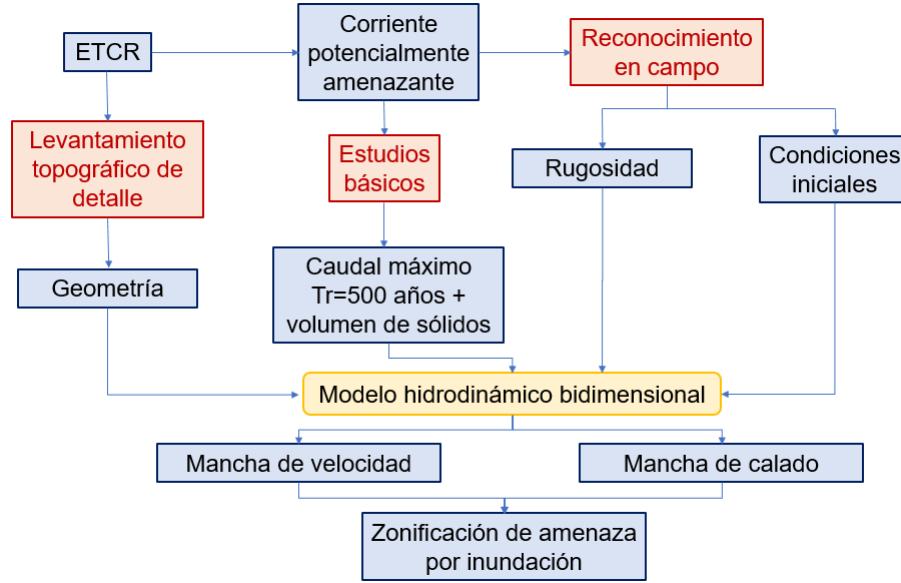


Figura 208: Procedimiento para zonificación de amenaza por inundación

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 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:

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

Donde h es el calado, U_x , U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g es la aceleración de la gravedad, ρ es la densidad del agua, z_b es la cota del fondo, τ_x es la fricción en la superficie libre debida al roza-

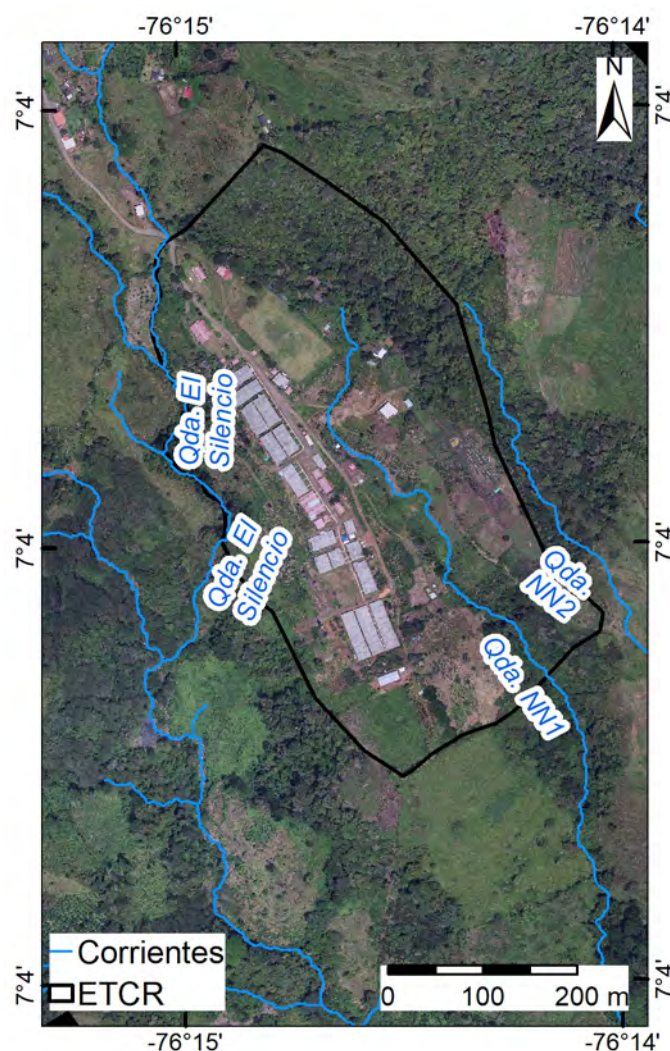


Figura 209: Corrientes antiguo ETCR Llano Grande

miento producido por el viento, τ_b es la fricción debida al rozamiento del fondo y ν_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 90 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 90: Caudales de simulación - inundaciones

Corriente	Área de drenaje (m ²)	Q máx 500 años (m ³ /s)
NN1 – AETCR	96680,8	4,5
NN2 – Este del AETCR	49810,5	2,3
Qda. El Silencio	713052,8	33,2
Qda. LlanoGrande	1701562,5	48,9

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 91. 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.

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).

Tabla 91: 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

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 de la quebrada El Silencio corresponden a un calado de 0,1 m y para la quebrada Llano Grande de 0,3 m.

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 ca-

tegoriza 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 210.

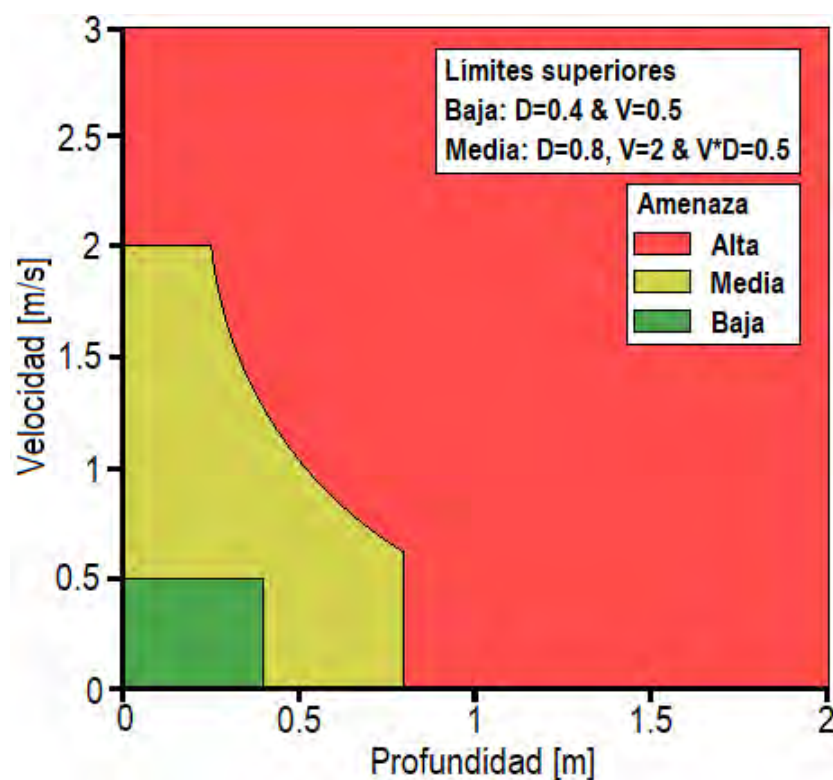


Figura 210: Categorización de amenaza por inundaciones

13.3. Resultados

Se presentan los resultados obtenidos de las variables hidráulicas necesarias para la zonificación de amenaza por inundación. En la Figura 211 se muestra la espacialización de la profundidad, mientras que en la Figura 212 se muestran los resultados de distribución espacial de la velocidad de flujo. Finalmente, en la Figura 213 se muestra la zonificación de amenaza por inundación para el antiguo ETCR Llano Grande en los tres niveles (alta, media y baja).

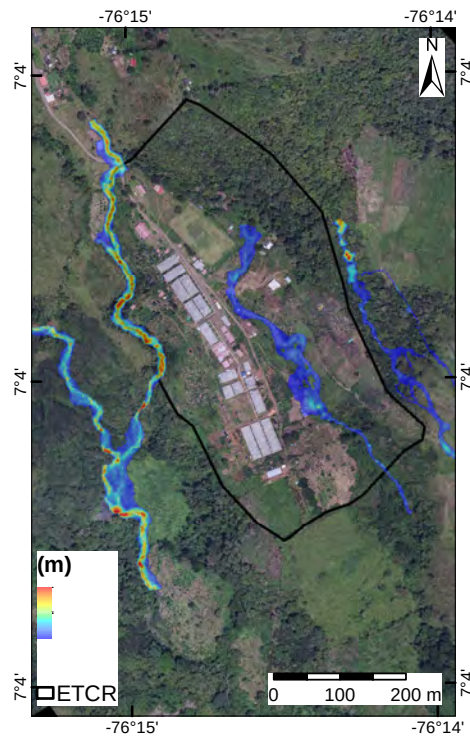


Figura 211: Distribución espacial del calado

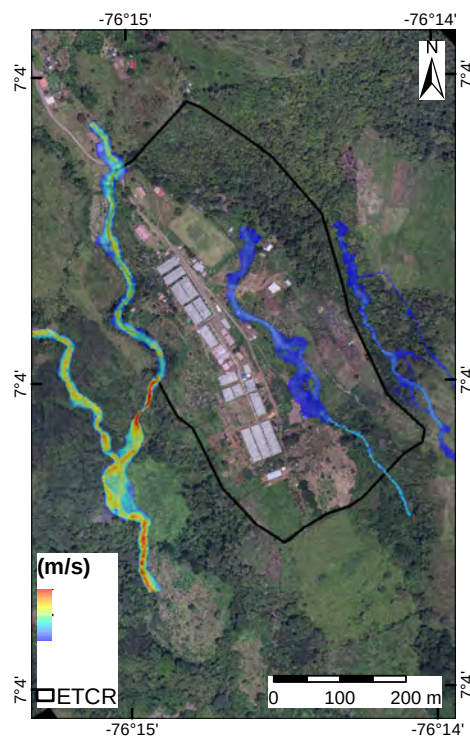


Figura 212: Distribución espacial de la velocidad

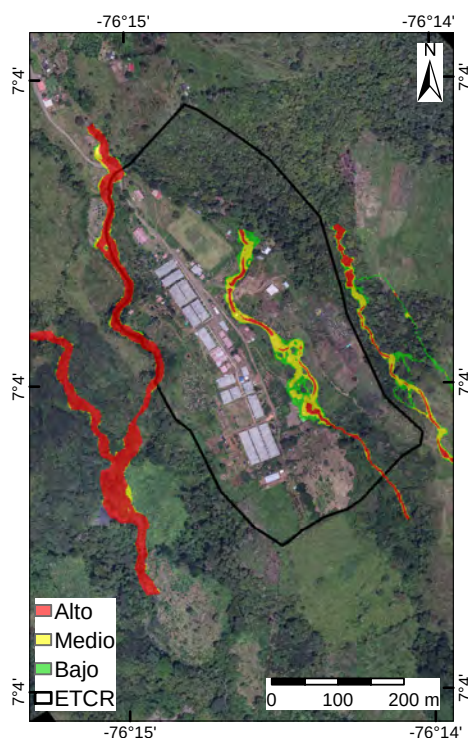


Figura 213: Nivel de amenaza por inundación

Para un evento extremo de inundación incluyendo la máxima concentración de sólidos en suspensión, asociado además a un período de retorno de 500 años se tienen calados de hasta aproximadamente 7 m, estas profundidades se ubicarían al exterior del antiguo ETCR, por el límite occidental en las inmediaciones de la quebrada El Silencio. Se tendrían también velocidades de hasta 13 m/s en las zonas de más alta pendiente de la quebrada El Silencio, demostrando así su comportamiento torrencial y justificando también de esta manera que sea tratada como tal.

Se observa que cerca del antiguo ETCR, en la parte nororiental la quebrada El Silencio sobrepasa la capacidad de la obra hidráulica de paso existente, sin embargo, el flujo sobrante no alcanza a ingresar al antiguo ETCR y por lo tanto no representa una amenaza directa.

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 214 y de esta manera la mancha por inundación representa el 6,3 %

del área del antiguo ETCR. La amenaza alta se presenta en la quebrada El Salado, la cual marca el límite oeste del lindero. La amenaza baja y media se observan principalmente sobre el drenaje al interior del predio, alcanzando las mayores amplitudes hacia el sur del polígono, antes de cambiar súbitamente de pendiente.

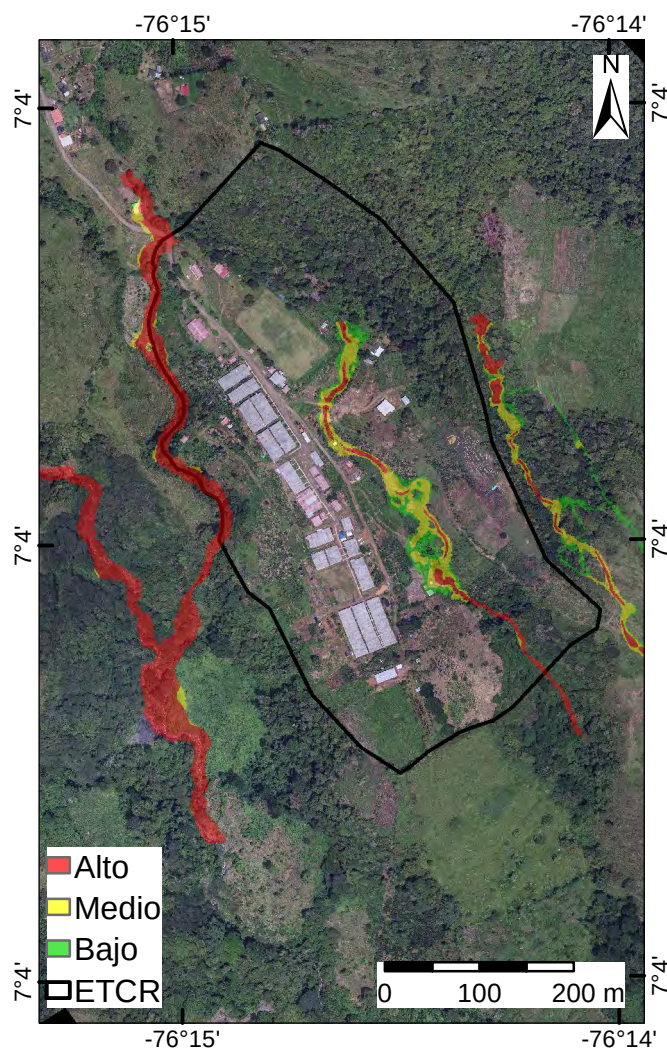


Figura 214: Zonificación de amenaza por inundaciones ajustada geomorfológicamente.

Además, se realiza la corrección recomendada en el Decreto 1807 del 2014, la cual consiste en una depuración correspondiente al área mínima cartografiada. Este ajuste adicional se presenta en la Figura 215 y constituye el resultado del mapa de amenaza final por inundaciones.

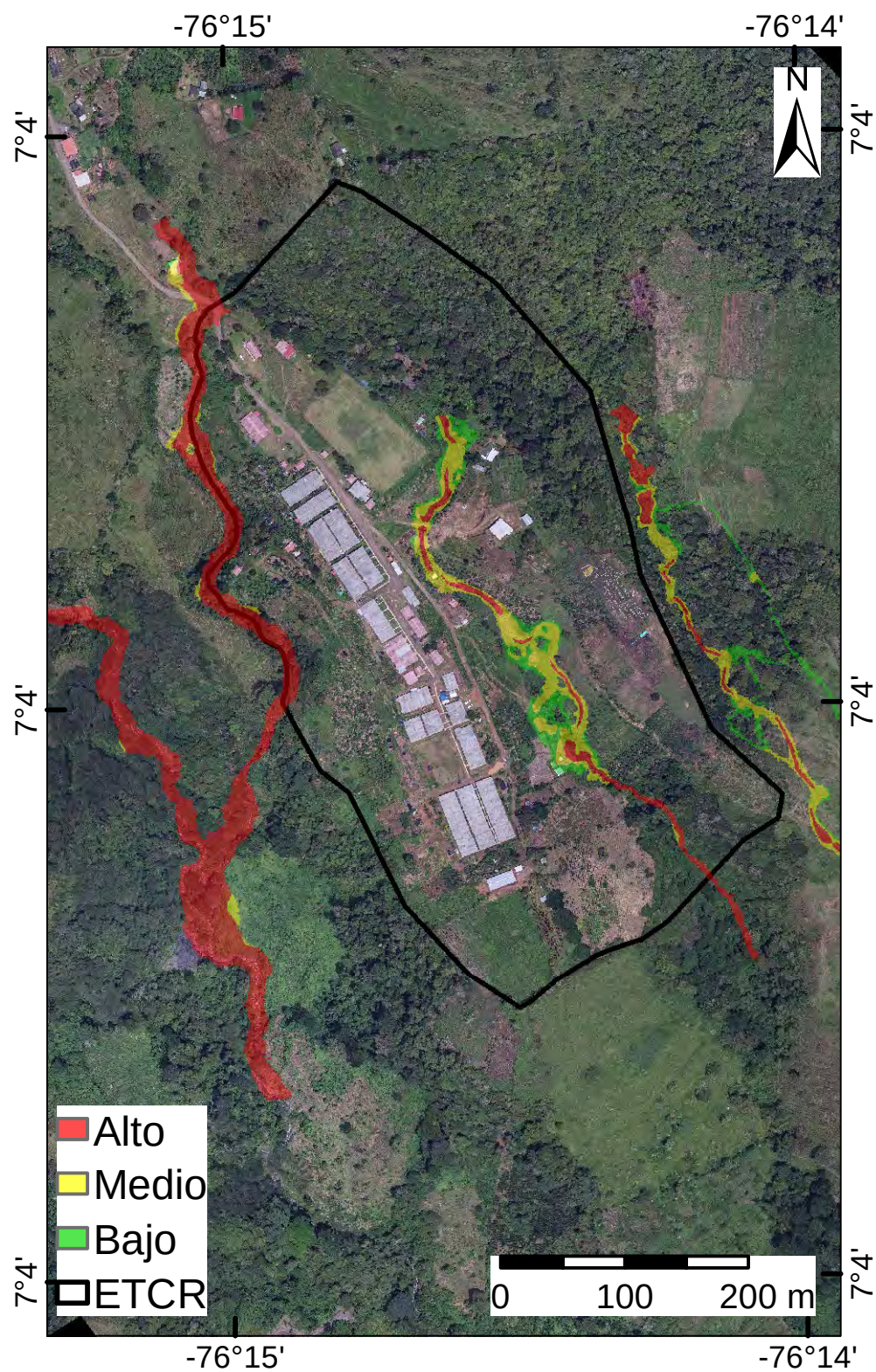


Figura 215: Zonificación final de amenaza por inundaciones.

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 Llano Grande. El afluente analizado fue la quebrada el Salado que drena en sentido norte-sur por el límite occidental del predio.

La evaluación de este fenómeno se llevó a cabo usando el modelo digital de elevación de 0,5m 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 porcen-

taje 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 210 (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 deposición 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 evaluó la quebrada El Silencio. Para este drenaje 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 caudal líquido pico de $19,6 \text{ m}^3/\text{s}$. 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 92: la densidad se presenta en kg/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 s^2/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 92: Parametrización del modelo

Concentración de sólidos	Fases	Densidad	Fricción	Arrastre	Depositación
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 216 la zonificación de amenaza por avenida torrencial según el modelo hidráulico.

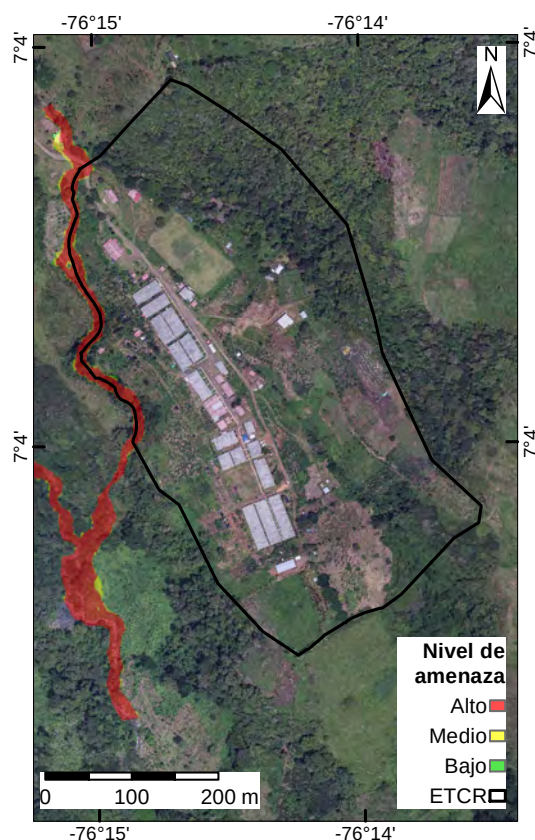


Figura 216: Zonificación de amenaza por avenida torrencial según el modelo hidrológico.

En la imagen se presenta un desbordamiento en el cruce vial del antiguo ETCR en el acceso noroccidental, desde la modelación 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 217 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 que varían de 70m a 140m con los máximos en el límite norte del predio inundando hasta 70m dentro del predio. Este escenario representa el de más potencial destructivo asumiendo que el drenaje tengan la energía suficiente para transportar la carga tan alta de sedimento impuesta y a su vez, representa el de menor probabilidad de ocurrencia.

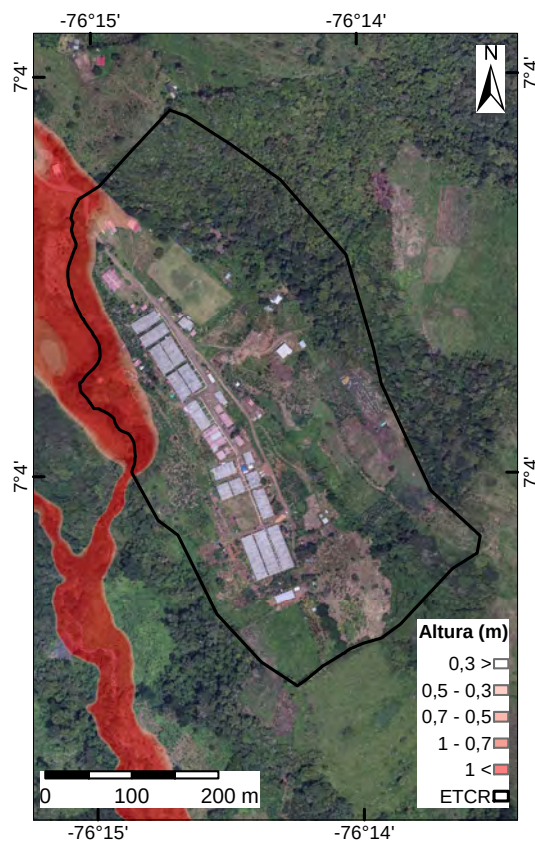


Figura 217: Simulación de la avenida torrencial de una fase con concentración de sólidos de 80 %.

Para el escenario de concentración de sólidos al 60 % visto en la Figura 218 el ancho medio del flujo es de 50m con máximos en el límite norte del predio de 120 m y logra inundar un máximo de 50m dentro del predio.

El flujo bifásico presentado en la Figura 219, por el contrario, representa un

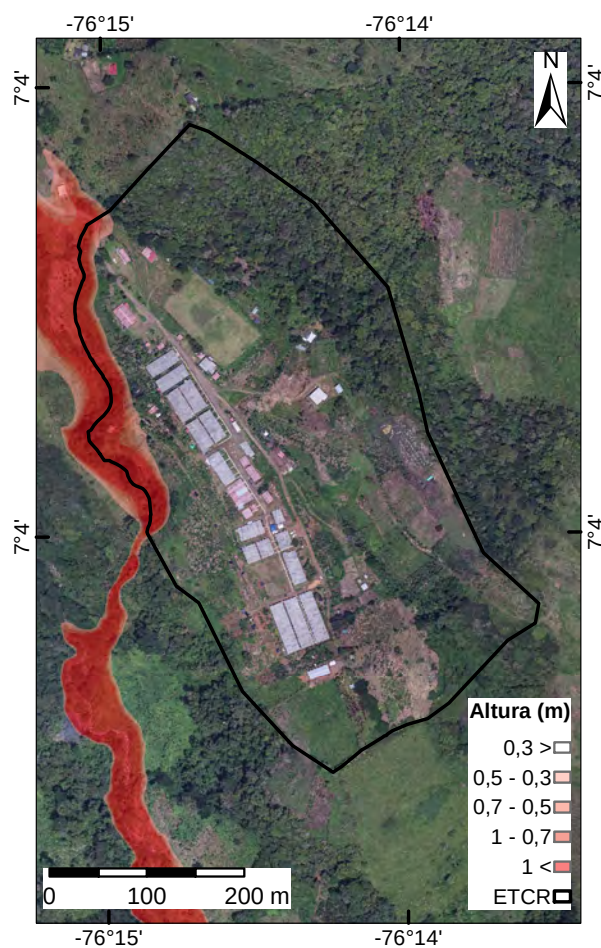


Figura 218: Simulación de la avenida torrencial de una fase con concentración de sólidos de 60 %.

escenario de menor poder destructivo que los flujos más concentrados pero de una probabilidad de ocurrencia mayor. Este flujo se limita al cauce del drenaje con anchos medios de 33 m y una inundación máxima dentro del predio de 15 m.

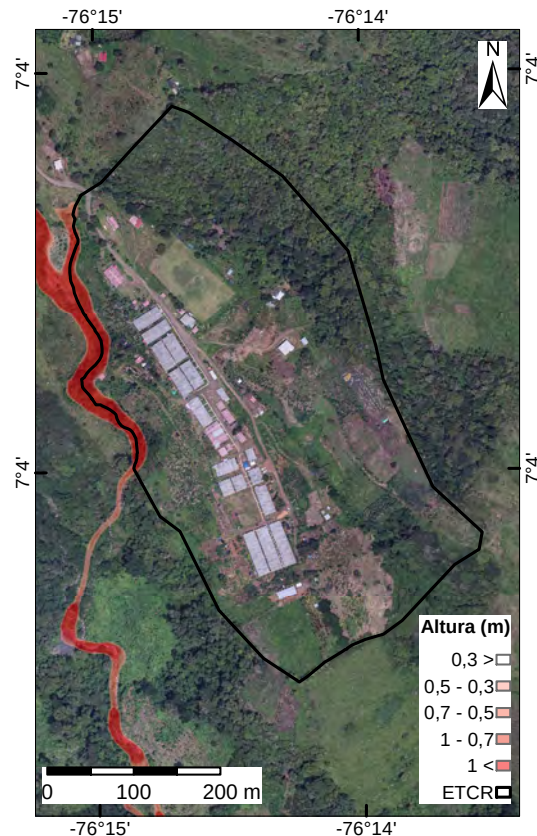


Figura 219: Simulación de la avenida torrencial de dos fases con concentración de sólidos de 40 %.

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 220.

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 221 como resultado del mapa de amenaza por avenidas torrenciales. El ajuste se realiza sobre la envolvente de amenaza media de la quebrada El Silencio y consiste en expandir el área sobre la cima de la componente geomorfológica Momxp localizada al norte del polígono y de esta manera, la mancha por avenida torrencial en antiguo ETCR Llano grande ocupa el 7,7 % del área total, con presencia de los tres niveles de amenaza

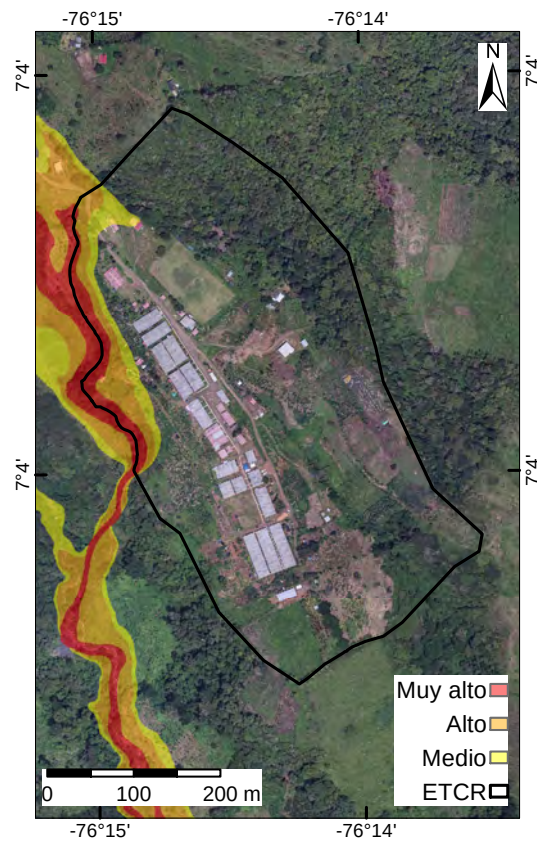


Figura 220: Zonificación de amenaza por avenidas torrenciales según modelo fluido-dinámico.

dentro del polígono.

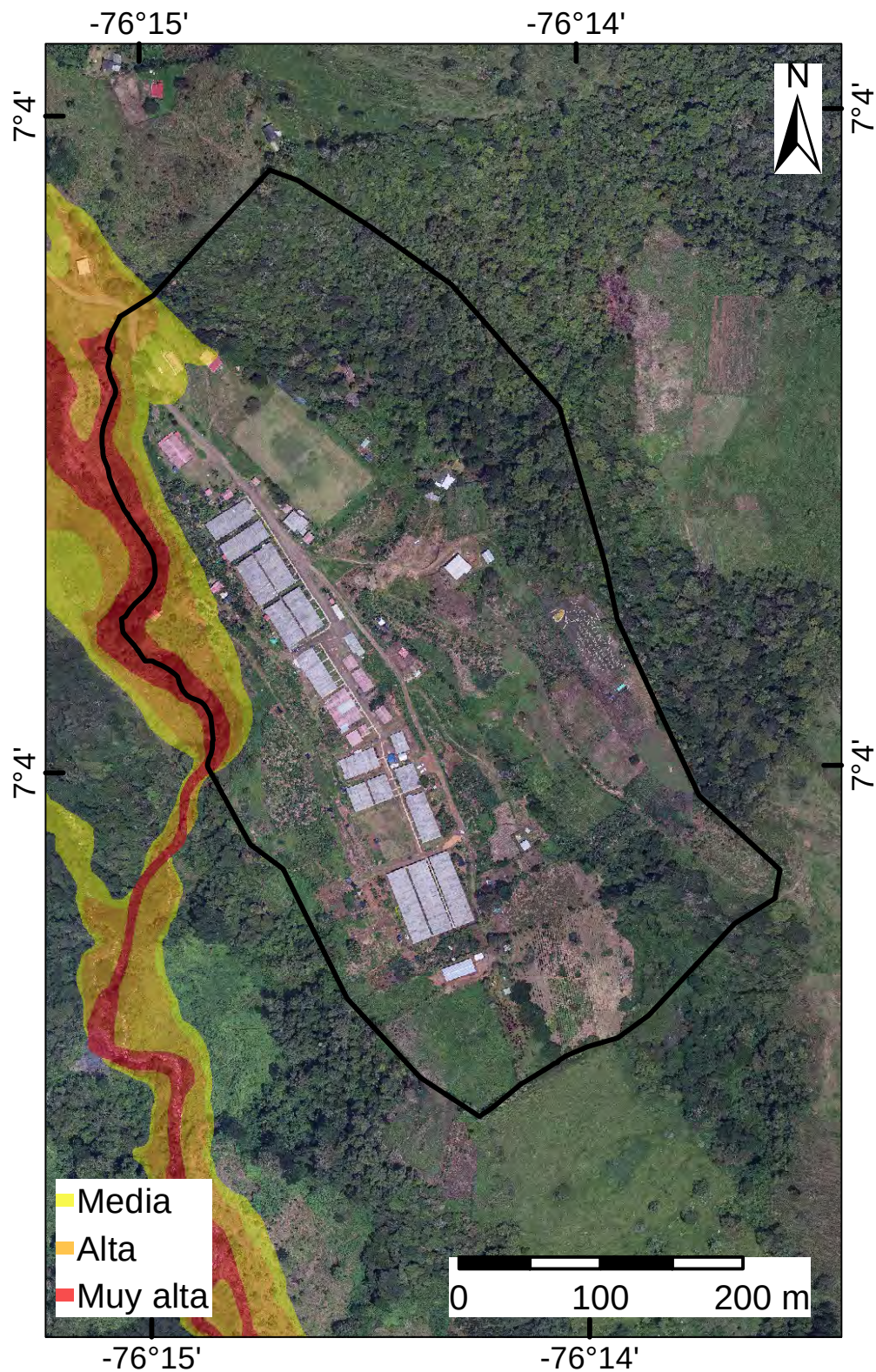


Figura 221: Zonificación final de amenaza por avenidas torrenciales.

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. avaflo w 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 Llano Grande.

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 antiguos ETCR, frente a una zona en proceso de consolidación que se proyectará bajo los estándares de la norma, se identificaron dos factores de vulnerabilidad desde la perspectiva social a evaluar, y que permiten, de acuerdo a lo anterior, identificar aspectos de demografía y estructura social que expresen sus preexistencias, antes del riesgo. Estos factores son las fragilidades y las capacidades.

La primera, las fragilidades, se describen a partir de dos dimensiones: una

social y una económica. La fragilidad social, da cuenta de las condiciones del colectivo 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 93 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 antiguo 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 de Llano Grande, se realizaron 60 encuestas con las que se caracterizó a 173 personas. Esta caracterización se hizo sobre las siguientes variables: género, edad, nivel de escolaridad, tipo de afiliación en salud, 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 173 o 60.

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

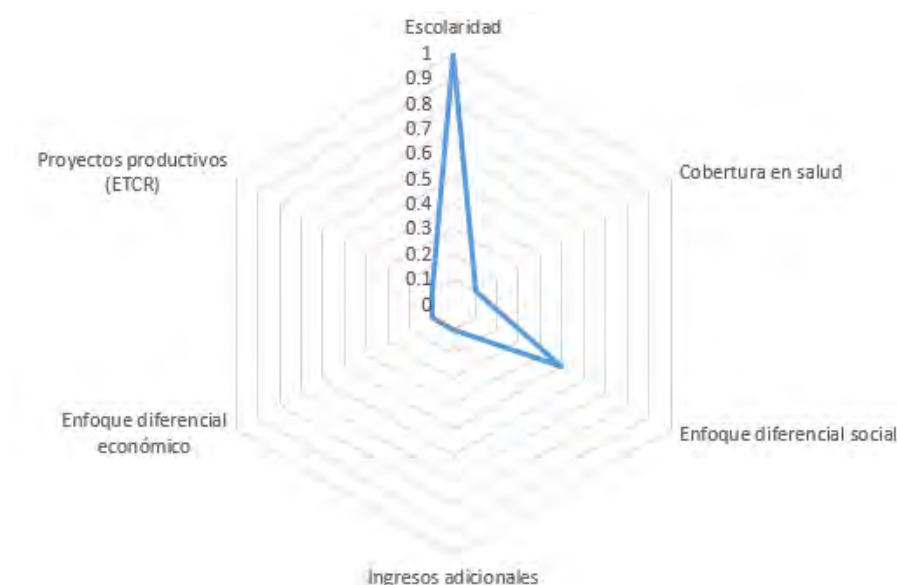


Figura 222: Fragilidad social y económica antiguo antiguo antiguo ETCR

Las fragilidades sociales del antiguo ETCR Llano Grande, fueron analizadas a partir de la cobertura en salud de sus habitantes, su nivel de escolaridad y un enfoque diferencial social, que incluye la discapacidad y la jefatura única del hogar. Por su parte las fragilidades económicas, se observaron por medio

Tabla 93: Esquema elementos para establecer la vulnerabilidad

FACTOR DE VULNERABILIDAD	CATEGORIA	INDICADORES (preguntas de encuesta)
Fragilidad Social	Escolaridad	Número de personas de 17 años en adelante con secundaria incompleta
	Cobertura en salud	Número de personas con cobertura en salud
	Enfoque diferencial social	Número de personas en condición de discapacidad
		Número de personas con jefatura única del hogar
		Número de mujeres con jefatura única del hogar sin ingresos adicionales
Fragilidad económica	Ingresos adicionales	Número de familias sin ingresos adicionales a la renta básica
	Enfoque diferencial económico	Número de mujeres sin ingresos adicionales a la renta básica/Número de hombres sin ingresos adicionales a la renta
	Proyectos productivos activos	Número de proyectos productivos activos
Capacidad organizativa	Organizaciones sociales	Número de formas asociativas (proyectos, cooperativas, comités, colectivos, asociaciones, entre otras) presentes en el antiguo ETCR
	Participación	Número de personas que pertenecen a organizaciones, colectivos, comités, y otras agrupaciones
	Confianza en actores locales	Número de personas que confían, cuando tienen una dificultad, en las organizaciones del antiguo ETCR
Capacidad de gestión y cooperación	Participación del antiguo ETCR a nivel local	Participación de los representantes del antiguo ETCR en instancias de decisión y/o planificación a nivel local
	Conocimiento y participación en la GRD	Número de personas que conocen organizaciones locales para la GRD
		Número de personas que participan en organizaciones para la GRD
	Alianzas y cooperación	Número de alianzas establecidas por antiguo ETCR
Capacidad de apropiación	Permanencia en el antiguo ETCR	Número de personas que se proyectan viviendo en el antiguo ETCR
	Expectativas de crecimiento	Número de personas que creen que sus familias vivirán con ellos en el antiguo ETCR

Tabla 94: Escala de valoración

CATEGORÍA	CALIFICACIÓN CUALITATIVA
Escolaridad	Alto
Cobertura en salud	Bajo
Enfoque diferencial social	Medio
Ingresos adicionales	Bajo
Enfoque diferencial económico	Bajo
Proyectos productivos (antiguo ETCR)	Bajo

de las familias sin ingresos adicionales a la renta básica, un enfoque diferencial económico que consideró mujeres sin ingresos adicionales a la renta básica frente a hombres sin ingresos adicionales a la renta básica y el número de proyectos productivos que se están desarrollando actualmente.

Como se observa en el Figura 223, la fragilidad más alta es la escolaridad, pues es la variable con mayor calificación en esta categoría (la fragilidad). El 30 % de las personas mayores a 17 años no ha terminado la secundaria o la dejó inconclusa y hay muy pocas personas con un nivel de formación profesional dentro del antiguo ETCR. Esta cifra, sin embargo, es muy variable, puesto que actualmente en los antiguo ETCR, se están desarrollando procesos de educación, formación y cualificación para que las personas en proceso de reincorporación realicen sus estudios desde básica primaria, hasta formación profesional.

En cuanto al enfoque diferencial social, variable que sigue en calificación en el gráfico, se observa que hay una calificación media, pues, por un lado, se encontró que la población con discapacidad que habita el antiguo ETCR corresponde al 9 %, siendo la mayoría de esta cifra discapacidad motora. Esta valoración se hizo de acuerdo a la media nacional, cuya cifra es 4,07 %. Frente a este referente, el 9 % es una cifra importante para una población de aproximadamente 250 personas que actualmente habitan este antiguo ETCR. Este es un dato muy significativo en la proyección de las viviendas permanentes, teniendo en cuenta que se deben adecuar para que las personas con movilidad reducida puedan acceder de manera equitativa a todos los lugares.

Por otro lado, se encontró que hay un número importante de personas con jefatura única del hogar, sin embargo, de estos hogares, el 2 % está a la cabeza sólo de mujeres; cabe anotar que esta variable no busca reflejar que las mujeres excombatientes son vulnerables por ser mujeres jefas de hogar, sino que pueden llegar a serlo, cuando son cabeza de hogar y no tienen ingresos adicionales a la renta básica.

Como se observa en la variable de enfoque diferencial económico, cuya valoración en las fragilidades es baja, aunque no haya un número significativo de personas sin ingresos adicionales, las que hay en su mayoría son mujeres (el 87%). Esto indica que la igualdad de oportunidades en la incorporación a la vida laboral, es todavía un asunto pendiente de los habitantes de este antiguo ETCR. Sin embargo, cuando se trata de hombres y mujeres excombatientes, hay una diferencia mínima entre ellos, pues ambos acceden al trabajo formal indiscriminadamente, en su mayoría empleados como escoltas de la Unidad Nacional de Protección.

Frente a este análisis, es fundamental comprender que la dinámica de género en los antiguo ETCR es muy diferente a la de otros colectivos, puesto que en la generalidad no hay roles tan marcados y el acceso a información y recursos es mucho más equitativo.

La cobertura en salud es una de las variables que indica menos fragilidad en el esquema, puesto que el 94 % de las personas cuentan con salud subsidiada e incluso algunos pertenecen al régimen contributivo.

Igualmente, tienen más de cuatro proyectos productivos activos y son muy variados. Cuentan con cultivos pan coger (como yuca, plátano y maíz), huerta para el autoconsumo, galpón para mil aves, algunos frutales. En lo colectivo, cuentan con un comité de confecciones que se ocupa actualmente de la elaboración de tapabocas (de los cuales han hecho donaciones a la comunidad), un restaurante liderado por mujeres (que actualmente se encuentra cerrado por la pandemia), dos cooperativas mediante las cuales se asocian para sembrar y proyectar iniciativas como la piscicultura y están iniciando un proyecto de ecoturismo en el antiguo ETCR, mediante el cual se emprenderá un proyecto de memoria.

15.1.2. Capacidades sociales

Las capacidades en el antiguo ETCR Llano Grande, se observaron a través de tres dimensiones: las capacidades organizativas, las capacidades de gestión y cooperación y las capacidades de apropiación.

Frente a las capacidades organizativas, la presencia de organizaciones sociales tiene un nivel alto en el antiguo ETCR, siendo una de las variables mayor calificadas del gráfico, puesto que tiene un número importante de organizaciones y colectivos, principalmente de índole económico y productivo, e igualmente hay una alta participación en otro tipo de agrupaciones, relacionadas con la



Figura 223: Capacidades antiguo ETCR

educación, la salud y la cultura, entre otros. Para ello, el 73 % de los habitantes del antiguo ETCR se organizan en comunas, comités o pequeñas asociaciones, que les permiten llevar a cabo proyectos familiares y comunitarios y generar escenarios de decisión para resolver sus necesidades y dificultades. La confianza en instituciones u organizaciones es menos representativa, lo cual obedece a que, en su mayoría, los habitantes del antiguo ETCR manifiestan mayor confianza en sus vecinos, amigos o familiares, y sólo el 33 % confía en organizaciones propias -como el partido FARC- o instancias estatales, encargadas de hacerles acompañamiento en el proceso de reincorporación.

Las capacidades relativas a la gestión y cooperación, varían entre el rango alto y bajo. Por un lado, hay una importante participación del antiguo ETCR en instancias de decisión local, debido a que participan activamente del Plan de Desarrollo, el Plan de Gobierno, el Concejo Territorial de Reincorporación y se creó una comisión que verifica qué se cumple y qué no, de estos escenarios. Además de ello, cuentan con un concejal electo de su partido y una de las excombatientes del antiguo ETCR, ocupa un cargo en la administración municipal.

Las alianzas y cooperación con organizaciones locales, regionales, nacionales o internacionales, son importantes, ya que cuentan con más de cuatro alianzas de este tipo. Entre ellas se cuenta con el apoyo de la UMATA en cuanto a capacitaciones y de FAO, ésta última con donación de semillas, además de acompañamiento de Naciones Unidas y otras entidades de carácter local como

Tabla 95: Escala de valoración

CATEGORÍA	CALIFICACIÓN CUALITATIVA
Presencia de organizaciones sociales	Alto
Participación en organizaciones, colectivos, comités, y otras agrupaciones	Alto
Confianza en instituciones u organizaciones	Medio
Participación en instancias de decisión y/o planificación a nivel local	Alto
Conocimiento y participación en organización para la GRD	Bajo
Alianzas y cooperación con organizaciones locales, regionales, nacionales o internacionales	Alto
Permanencia en el antiguo ETCR	Alto
Expectativas de crecimiento de las familias en el antiguo ETCR	Alto

el hospital municipal, que realiza constantemente campañas de promoción de la salud y prevención de la enfermedad.

Sin embargo, en lo referido al conocimiento y la participación en la gestión del riesgo de desastres, variable más baja del gráfico, se encuentra que sólo once personas conocen alguna organización para la gestión del riesgo y de ellas ninguna participa en las mismas. Asimismo, la generalidad es que no están familiarizados con el riesgo de desastres y son poco conscientes de la probabilidad de ocurrencia de eventos socio-naturales, por lo que no han desarrollado ningún tipo de formación y/o iniciativa para fortalecer este escenario.

En cuanto a las capacidades de apropiación, tanto la permanencia como las expectativas de crecimiento en el antiguo ETCR son altas, esto relacionado con que el 82 % de las personas que actualmente habitan el antiguo ETCR se proyectan viviendo definitivamente allí, pero, además, de éstas, el 53 % creen que traerán a sus familias a vivir con ellos. Las razones más visibles, obedecen a que muchos de los excombatientes que habitan el antiguo ETCR, esperan no sólo la construcción de sus viviendas, sino la formalización de la tierra, para poder cultivar predios propios y a partir de ello, generar una economía más estable para sí mismos y sus familias. Este hecho no sólo obedece a la estabilidad económica, sino a la comprensión de las transitoriedades y permanencias en el lugar, sus visiones de futuro en términos de ocupación y crecimiento en el territorio, lo cual es importante para identificar los niveles de cohesión social adquiridos, y

finalmente, la apropiación del territorio. Frente al riesgo de desastres, esta capacidad incide, puesto que puede fortalecer los procesos de participación frente al tema y con ello, la gestión del riesgo en sus territorios.

15.2. Vulnerabilidad física

En el presente capítulo se determina la vulnerabilidad de las estructuras ubicadas en el antiguo ETCR Llano Grande 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 Ardiszone, 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 calculo de vulnerabilidad:

$$V = \begin{cases} \frac{1}{2}(\frac{I}{1-S})^2 & \text{si } I \leq 1 - S \\ 1 - \frac{1}{2}(\frac{1-I}{S})^2 & \text{si } I > 1 - S \end{cases} \quad (15.1)$$

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).

$$S_e = 1 - (1 - S_{tip})(1 - S_{alt})(1 - S_{con})(1 - S_{ed}) \quad (15.2)$$

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 96).

Tabla 96: 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 97).

Tabla 97: Factor de fragilidad por altura de la edificación

TIPOLOGÍA	NÚMERO DE PISOS	S_{alt}
E,F	≥ 2	0,9
D	≥ 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 98).

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 99).

El cálculo del valor de vida útil se puede determinar en función del tipo de edificación (ver Tabla 100).

Tabla 98: 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

Tabla 99: 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 100: Vida útil en función del tipo de edificación

TIPOLOGÍA	VIDA ÚTIL
A y B	50 años
C y D	30 años
E	15 años
F	1-2 años

El actual asentamiento del antiguo ETCR Llano Grande en Dabeiba, Antioquia, presenta una extensión de 16 hectáreas y contempla 17 módulos de alojamiento. Las áreas comunes con la que cuenta este antiguo ETCR son enfermería, Biblioteca y Áreas de recreación. Además, cuenta con servicios básicos como la Planta de tratamiento de agua Potable (PTAP) con captación de fuente hídrica superficial, 8 pozos sépticos con capacidad de 4,500 Lts, conexión eléctrica y suministro de gas (ARN, 2020)

Actualmente los módulos de vivienda Figura 224, se encuentran dispuestos a manera de “galpones” en habitaciones de uso privado por persona de 6 x 4 metros, cada módulo está compuesto de estructura de acero y tejas de fibrocemento, dividido internamente de perfilería en aluminio con paneles de drywall a una sola cara (Barreto, 2019). Además, cada módulo cuenta con batería sanitaria de dimensiones 1,00x1,60x1,10 metros, donde se tiene el servicio de ducha, baño y lavadero para cada 5 personas (ARN, 2020).

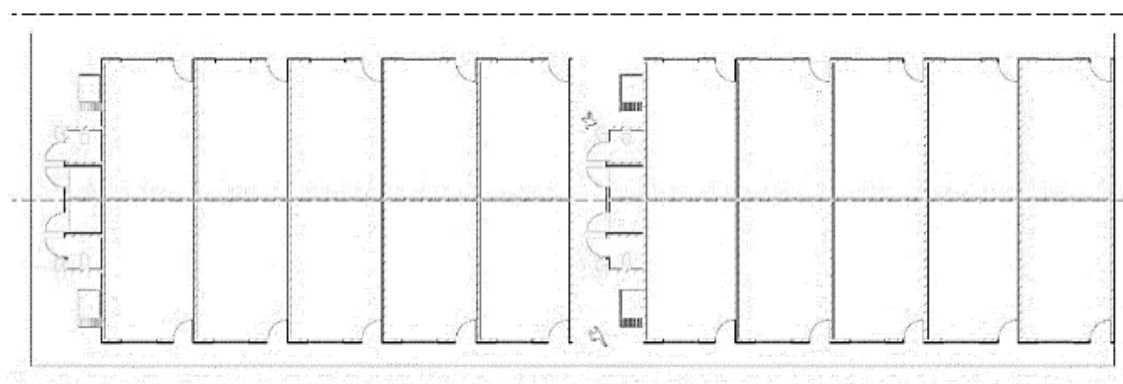


Figura 224: Planos módulos actuales de vivienda “Galpones” (Barreto, 2019).

Durante las visitas en campo se obtuvo el inventario de las estructuras construidas en el espacio de asentamiento, identificando las dimensiones y características del material en que se encuentran contruidos 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 las indicadores necesarias para obtener la fragilidad de las estructuras. En la Tabla 101 se presentan los valores empleados para las tipologías comunes identificadas y sus correspondientes factores. Con respecto al factor S_{tip} se considera que las viviendas en su mayoría

Tabla 101: Factores de fragilidad de las estructuras.

Construcción	S_{tip}	S_{alt}	S_{con}	S_{ed}	Fragilidad (S_e)
Módulos	0,90	0,90	0,50	0,10	0,996
CDI	0,90	0,90	0,25	0,10	0,993
PTAP	0,90	0,90	0,25	0,10	0,993
Casa Modelo	0,50	0,05	0,75	0,10	0,893

están hechas acero, fibrocemento, aluminio y drywall, por lo tanto se optó clasificar esta estructura como estructuras ligeras; la casa modelo cuentan con una estructura con mampostería reforzada; la Bodega, CAI y CDI son estructuras con confinamiento deficiente (ver Figura 225).

Para el estado de conservación de las estructuras (S_{con}), se estableció un estado de mantenimiento en general con deformaciones medias, 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.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 225: Estructuras encontradas en el antiguo ETCR. (a) Casa Modelo, (b) Bodega, (c) CAI, (d) CDI

Con base en los resultados (ver Tabla 101), se observa que el mayor valor de fragilidad está asociado a los Módulos, con un valor de 0,996 con respecto a las demás construcciones analizadas con valores de 0,993 para el CDI y la PTAP y 0,893 para la Casa Modelo. En general, los valores de 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. Los 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).

$$I_{rap} = 1 - (1 - I_{f-pre}) * (1 - I_{f-prof}) \quad (15.3)$$

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 Llano Grande de la siguiente forma; en las Figuras 226, 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.

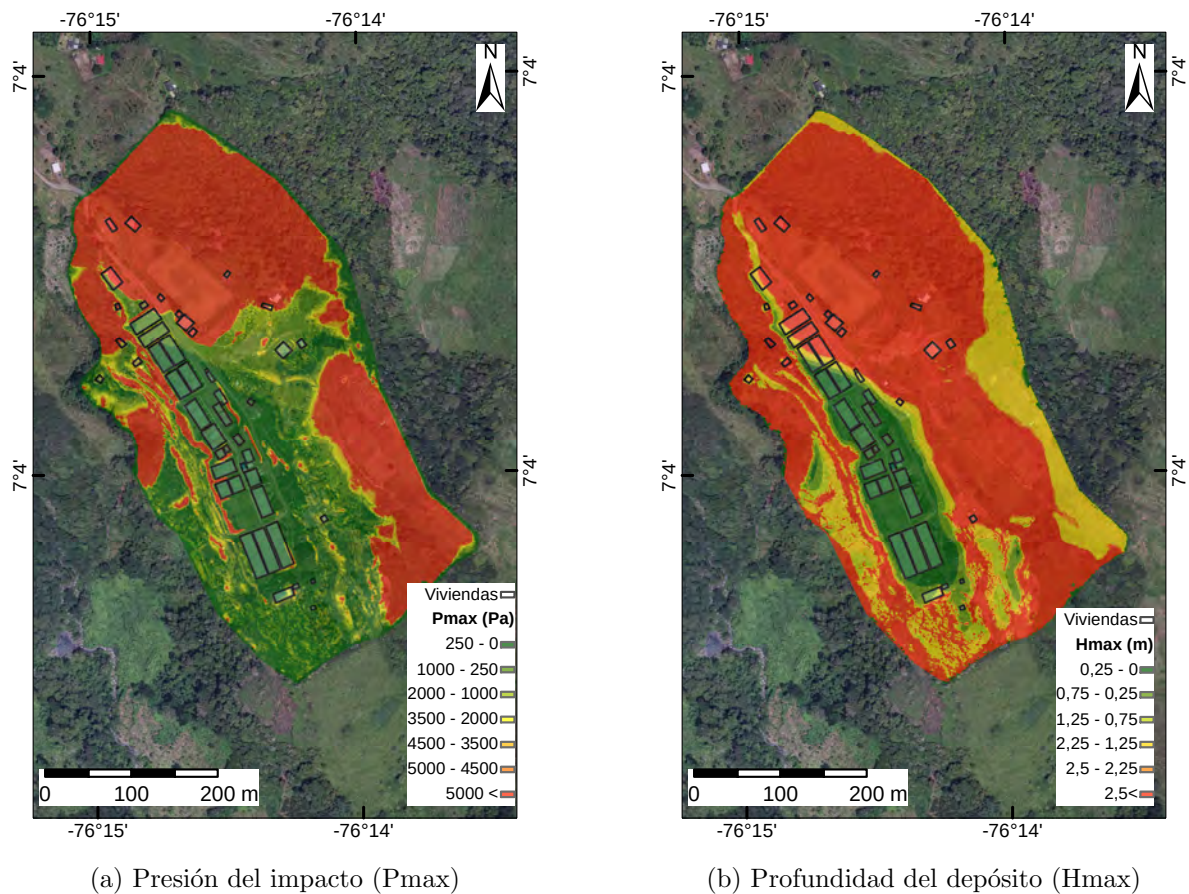


Figura 226: Mapas de propagación por movimientos en masa en el antiguo ETCR de Llano Grande

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 102). Obtenida la relación entre las variables mencionadas, se puede implementar la Tabla 103, la cual permite transformar cada tasa en el parámetro de intensidad por presión (SGC, 2015).

Tabla 102: 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 103: 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

Por otro lado, el parámetro de intensidad asociado a la profundidad del deslizamiento (I_{prof}) se estima a partir de la relación entre la profundidad del 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 104, la cual asigna a cada relación el parámetro de intensidad asociado a la profundidad del movimiento en masa (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 104: 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 227 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).

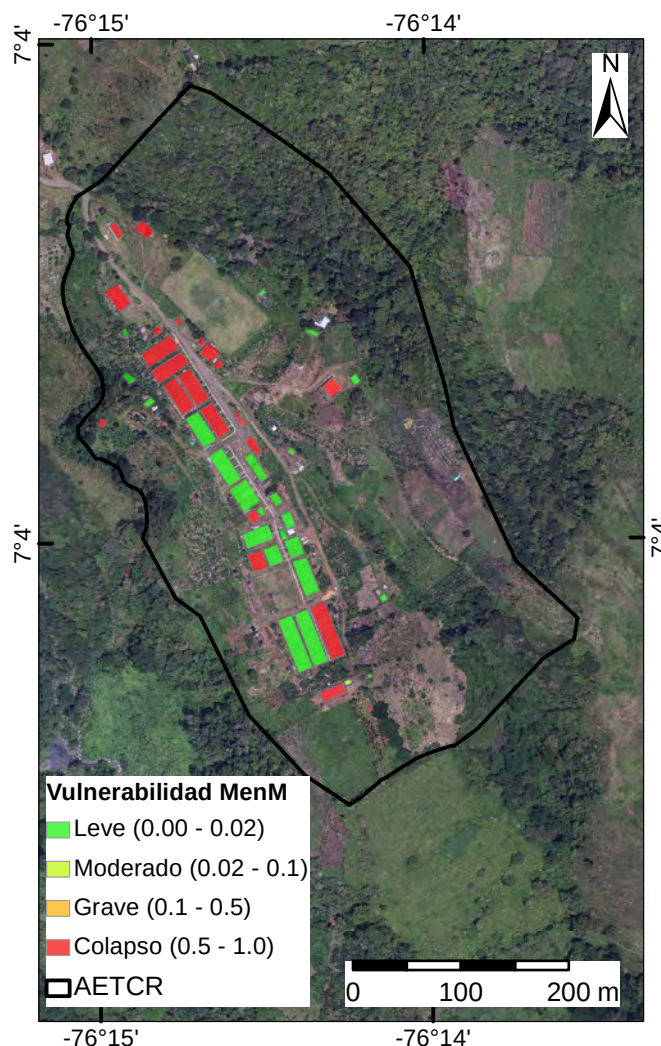


Figura 227: Vulnerabilidad por movimientos en masa en el antiguo ETCR de Llano Grande

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 O. Pinos J Timbe L (2020):

$$EAD = 0,5 \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{i+1}} \right) (D_i + D_{i+1}) \quad (15.4)$$

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 O. Pinos J Timbe L (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 228 se presentan las curvas de daño según los materiales empleados en los elementos expuestos. Estas curvas son definidas en la metodología de O. Pinos J Timbe L (2020) que se realizó por medio de una compilación exhaustiva de funciones de daño relativo representadas en la Tabla 105. 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 (O. D. Pinos J Timbe L, 2017).

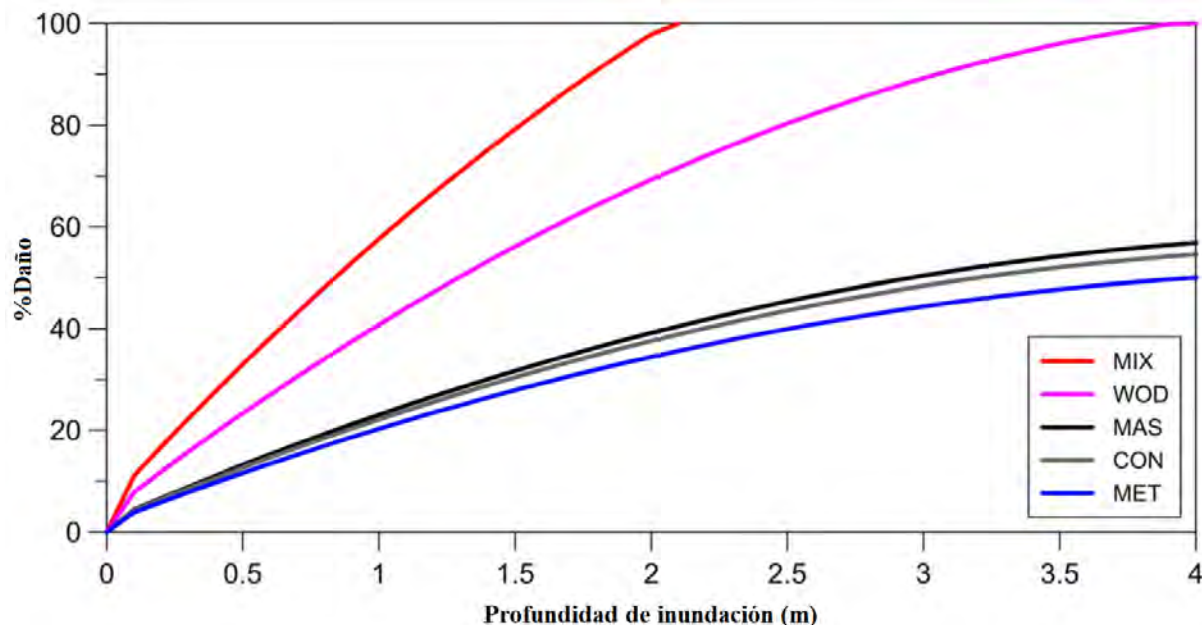


Figura 228: Funciones de daño según la profundidad de inundación en construcciones residenciales bajo diferentes materiales (material mixto, MIX; madera, WOD; mampostería, MAS; concreto, CON; acero/metal, MET). Adaptado de O. Pinos J Timbe L (2020).

Tabla 105: 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 228 representa el porcentaje de daño en diferentes tipos de materiales de la Tabla 106 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.

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 106: 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 105) 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 antiguo espacios territoriales de capacitación y reincorporación.

En la Tabla 107 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 se 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.statistics de Arcmap, al extraer el valor máximo de la inundación presente en la vivienda.

Tabla 107: Factores en la implementación de la metodología para las estructuras antiguo ETCR Llano Grande.

Construcción	Categoría	Tipo de material	mf	Profundidad inundación	Daño (%)
Estructura de alojamiento	Residencial	Mampostería	1	0 - 0,35m	0 - 19
Casa modelo	Residencial	Mampostería	1	0m	0
Centro comunitario	Residencial	Mampostería	1	0m	0
Salón común	Residencial	Mampostería	1	0m	0
Puesto de salud	Residencial	Mampostería	1	0m	0

15.2.2.2. Mapa de vulnerabilidad por Inundación

La representación de las viviendas afectadas por inundación se observa en la Figura 229 en la que se muestra el porcentaje de daño con respecto al calado. En la Figura 229 se observa que la lejanía de las viviendas a las quebradas señaladas en la Figura 209 (Quebrada El silencio, NN1 y NN2) hace que las viviendas se encuentren muy poco afectadas por el nivel del agua durante un evento de inundación. Se logra identificar que 1 vivienda podría estar afectada levemente por la mancha de inundación.

15.2.3. Vulnerabilidad por avenidas torrenciales

En la Figura 230 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. En total se encuentran 5 viviendas afectadas en vulnerabilidad alta.

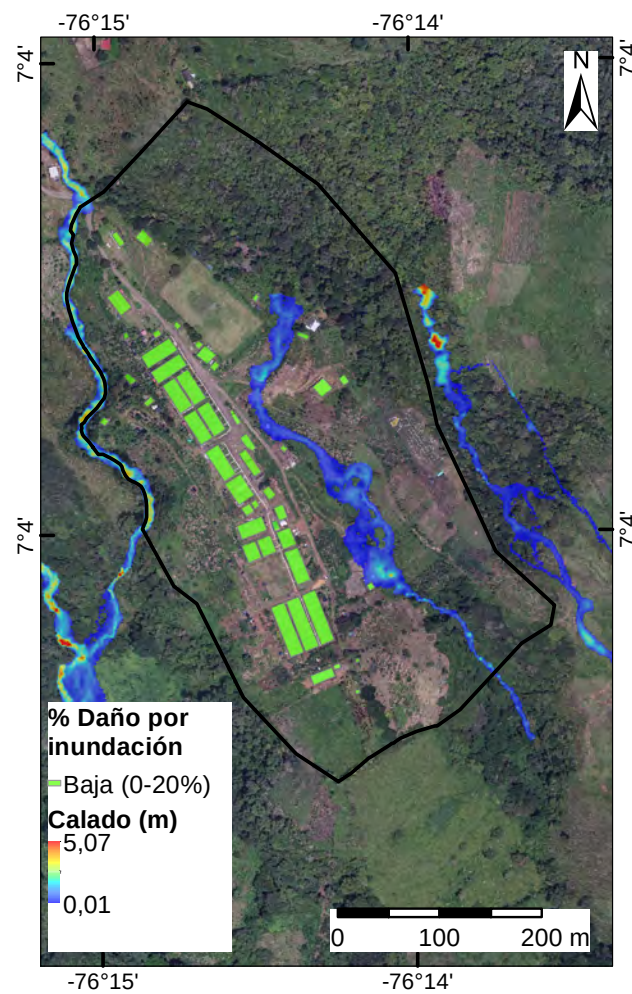


Figura 229: Daño por inundación en el antiguo ETCR de Llano Grande

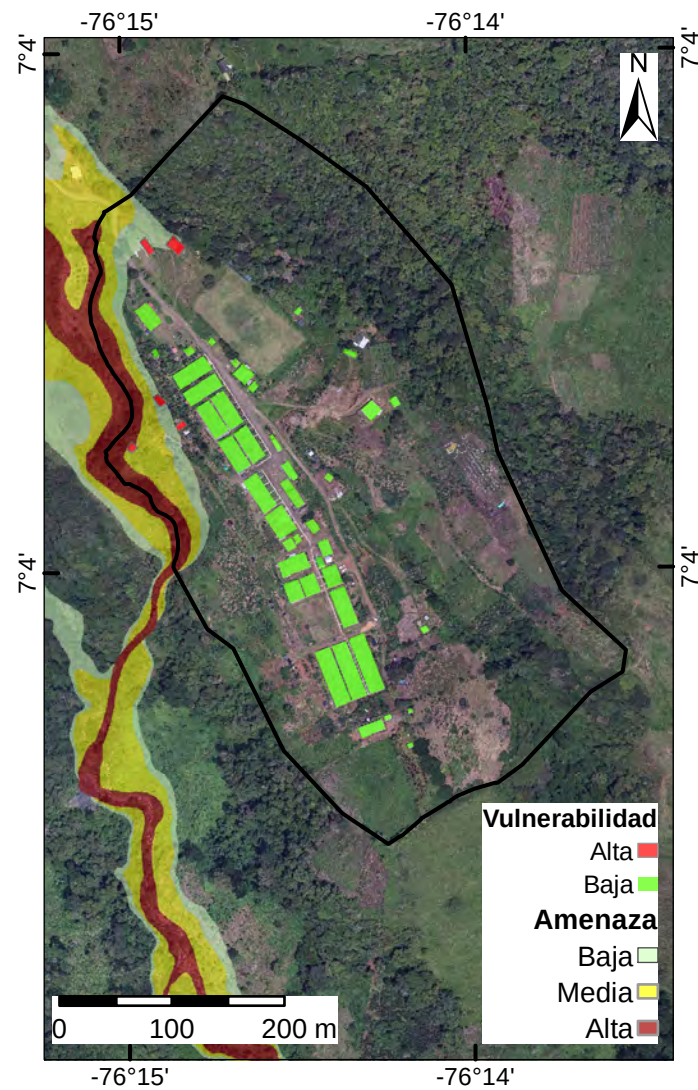


Figura 230: Daño por avenidas torrenciales en el antiguo ETCR de Llano Grande.

Referencias

- ARN. (2020). *Aeter antioquia - llano grande*. Descargado de http://www.reincorporacion.gov.co/es/reincorporacion/Paginas/ETCRs/AETCR_llano_grande.aspx
- Barreto, J. (2019). Ren-hacer hábitat para tejer la sociedad del posconflicto. *Pontificia Universidad Javeriana*.
- Crozier, M. J., y Glade, T. (2005). Landslide hazard and risk: issues, concepts and approach. *Landslide hazard and risk*, 1–40.
- Du, J., Yin, K., Lacasse, S., y Nadim, F. (2014). Quantitative vulnerability estimation of structures for individual landslide: application to the metropolitan area of san salvador, el salvador. *Electron J Geotech Eng*, 19, 1251–1264.
- Du, J., Yin, K., Nadim, F., y Lacasse, S. (2013). Quantitative vulnerability estimation for individual landslides. En *Proceedings of the 18th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering, paris* (pp. 2181–2184).
- Frédéric, L., Asté, J., y Leroi, E. (1996, 01). Vulnerability assessment of elements exposed to mass-movement: Working toward a better risk perception. En (p. 263 - 269).
- Heinimann, H. R. (1999). *Risikoanalyse bei gravitativen naturgefahren*. BUWAL, Dokumentation.
- Kaynia, A., Papathoma-Köhle, M., Neuhäuser, B., Ratzinger, K., Wenzel, H., y Medina-Cetina, Z. (2008). Probabilistic assessment of vulnerability to landslide: application to the village of lichtenstein, baden-württemberg, germany. *Engineering Geology*, 101(1-2), 33–48.
- Li, Z., Nadim, F., Huang, H., Uzielli, M., y Lacasse, S. (2010). Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards. *Landslides*, 7(2), 125–134.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., y Thieken, A. (2010). Assessment of economic flood damage. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 10(8), 1697–1724.
- Pinos J, O., Timbe L. (2020). Assessment of microscale economic food losses in urban and agricultural areas: case study of the santa bárbara river, ecuador. *Natural Hazard*.
- Pinos J, O. D., Timbe L. (2017). Métodos para la evaluación del riesgo de inundación fuvial: revisión de literatura y propuesta metodológica para ecuador. *Maskana*.
- 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, respectivamente. A continuación, se presentan los resultados del riesgo específico y total para los elementos expuestos actuales en el antiguo ETCR Llano Grande.

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 203). 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 226) se estiman como categoría de amenaza alta, y por ende se le asigna dicha probabilidad al polígono que probablemente esté sujeta a la interacción con la masa de suelo deslizable.

En la tabla 108 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 108: Probabilidad espacial de la amenaza por movimientos en masa

<i>Categoría</i>	<i>%</i>	<i>Probabilidad</i>
Baja	31,6	0,31597
Media	8,06	0,01109
Alta	60,34	0,08303

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 Llano Grande se estima de \$ 107.287.697.

La tabla 109 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 Llano Grande. Los cuales se pueden identificar espacialmente haciendo uso del campo "Vivienda Expuesta" de la Tabla 109 y la Figura 231.

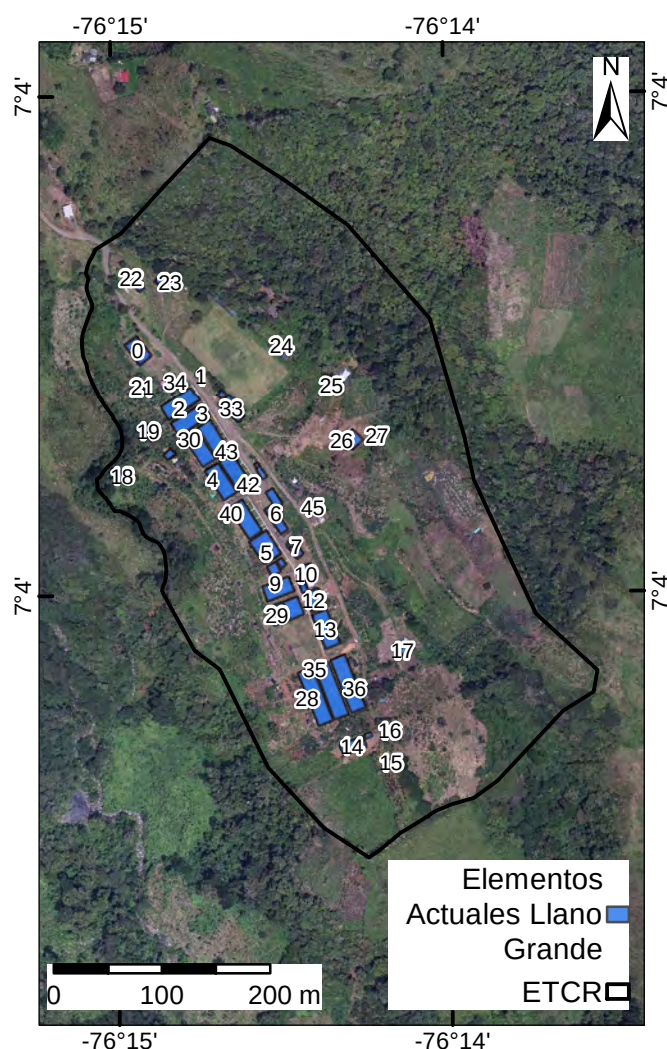


Figura 231: Elementos actuales dentro del antiguo ETCR Llano Grande

Tabla 109: Pérdidas Esperadas Anuales (PEA) del escenario actual de algunas viviendas expuestas en el antiguo ETCR Llano Grande

Viviendas Expuestas	PEA Inundación (\$)	PEA AVT (\$)	PEA MenM (\$)	PEA Total (\$)
0	0	0	8.908.097	8.908.097
4	0	0	0	0
8	0	0	8.558.693	8.558.693
15	0	0	4.943.994	4.943.994
18	0	214.575	8.908.097	9.122.672
37	0	0	499.856	499.856

A partir de los resultados obtenidos, de todas las viviendas evaluadas (Figura 231), se identifica que el 50 % de las viviendas expuestas en el escenario

actual presentan afectaciones por movimientos en masa, que representa pérdidas esperadas anuales de \$ **192.082.414**, el 10,9 % por avenidas torrenciales, que representa pérdidas esperadas anuales de \$ **1.072.875**, y no se evidencia afectaciones por inundación. Con un total de \$ **193.155.289** pérdidas anuales esperadas teniendo en cuenta todos los eventos mencionados. A partir de los resultados, se logra que 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 Llano Grande.

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 109 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.

El predio de Llano Grande actualmente cuenta con 175264,46 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 39174,67 m^2 para localizar las infraestructuras futuras.

Para la implantación de las viviendas rurales, se plantean predios de 300 m^2 con el fin de asegurar pequeñas huertas y jardines privados en cada predio.

En La Figura 232 se observa una posible distribución de los 109 predios necesarios. De los 39174,67 m^2 disponibles para implantar las estructuras futuras, se utilizan 36851,42 m^2 para viviendas y vías de acceso, resultando así un espacio

disponible de $2330,54 \text{ m}^2$ para ubicar usos complementarios y espacio público.

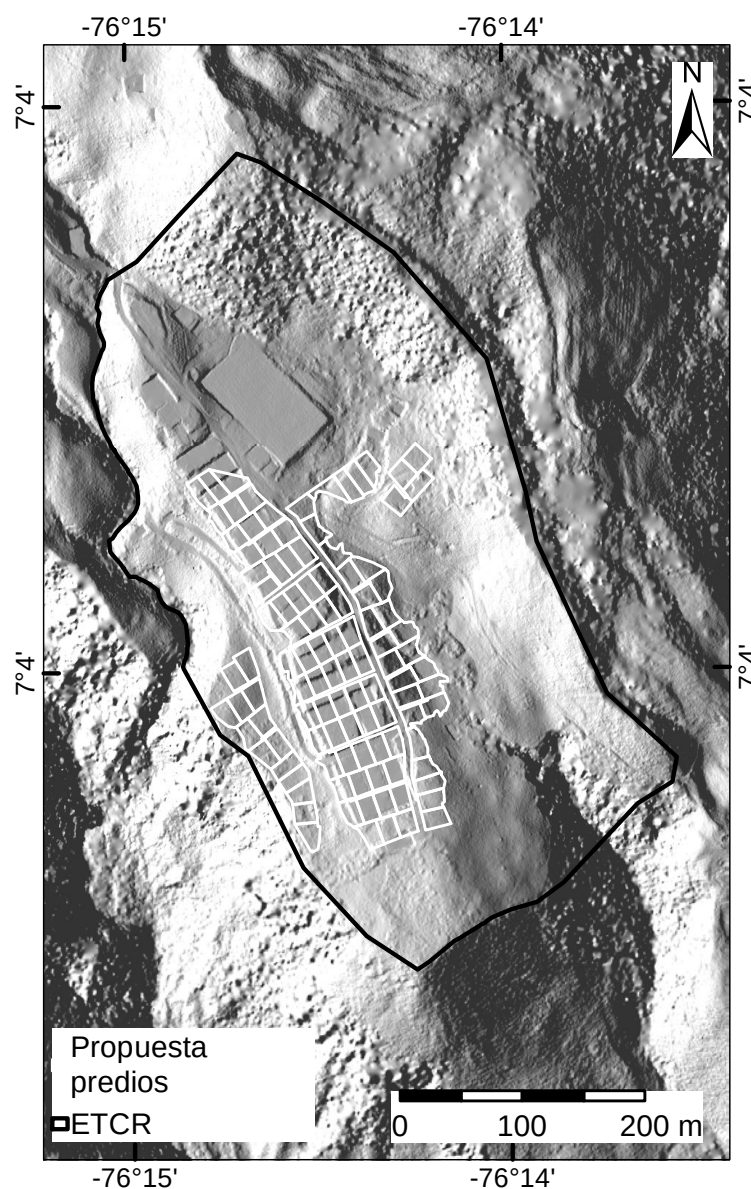


Figura 232: Propuesta predios para viviendas

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 233 unos recuadros 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 $55,8 \text{ m}^2$).

Como se observo en La Figura 233 las viviendas se encuentran agrupadas

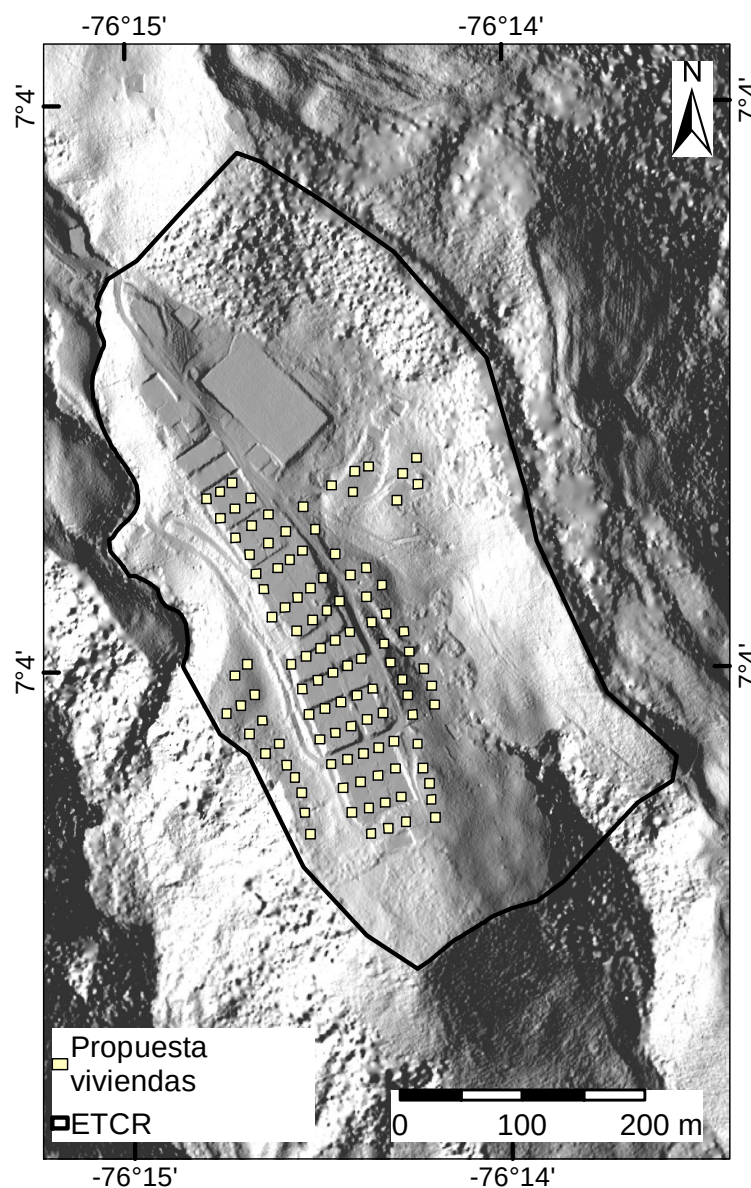


Figura 233: Viviendas guías

para el centro-occidente del predio, lugar donde se presenta la condición de amenaza mas baja, pese a algunos zonas de los laterales mas occidentales que cuenta con aproximadamente cuatro predios que presentan condiciones altas. Estas zonas fueron evaluadas por los modelos de estabilidad mostrando que son área con un riesgo mitigable y por ello se continua con la propuesta en estos lugares, ya que el lado mas norte del predio presenta restricciones normativas y la ladera oriental presenta fuertes pendientes y amenaza a eventos de movimientos en masa alta.

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 234). Los prototipos de vivienda comprenden un área de entre 52,8 y 55,55m². El valor económico de cada vivienda se estima de \$ 38.995.699.



Figura 234: 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 110). Todos los valores presentados anteriormente se tomaron bajo el mismo criterio para las 108 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 110: 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 108.

Con respecto a la vulnerabilidad en los distintos eventos; en la Figura 235 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 235a 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 235b 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 236.

Con respecto a los eventos de inundación y avenidas torrenciales en las Figuras 237 y 238 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 Llano Grande. En la Tabla 111 se presenta los riesgos económicos (pesos - \$) asociados a la posible exposición de algunas viviendas según la ubicación preliminar de las viviendas, las cuales son identificadas espacialmente en la Figura 239.

A partir de los resultados obtenidos, de todas las viviendas evaluadas (Figura 239), se identifica que el 64,8 % de las viviendas expuestas en el escenario

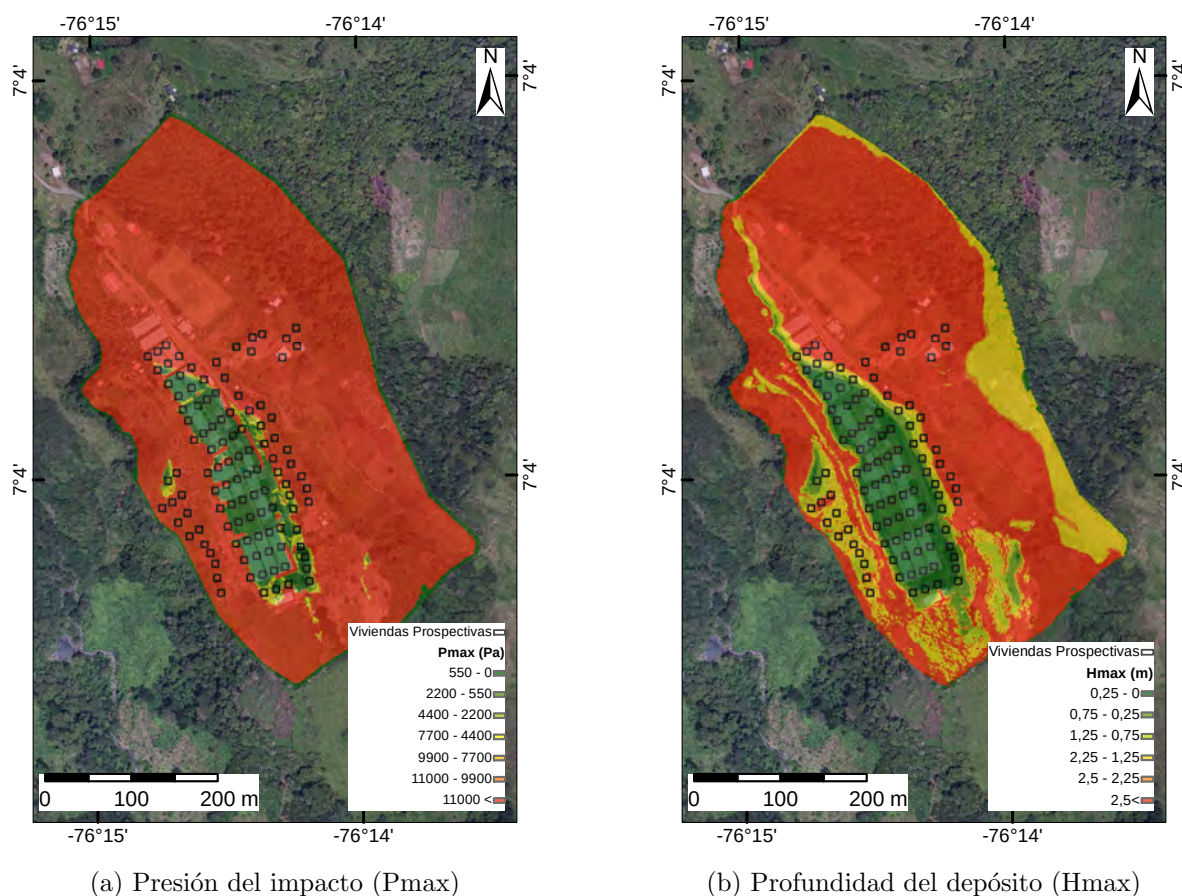


Figura 235: Mapas de propagación por movimientos en masa, escenario proyectado en el antiguo ETCR Llano Grande.

Tabla 111: Pérdidas Esperadas Anuales (PEA) del escenario proyectado de algunas viviendas expuestas en el antiguo ETCR Llano Grande

Viviendas Expuestas	PEA MenM (\$)	PEA AVT (\$)	PEA Inundación (\$)	PEA Total (\$)
0	3.237.813	0	0	3.237.813
97	3.237.813	0	11.827	3.249.641
12	2.201.713	0	0	2.201.713
26	805.238	0	0	805.238
2	0	0	0	0

proyectado presentan afectaciones por movimientos en masa, que representa pérdidas esperadas anuales de **\$ 196.133.494**, el 5,6 % por inundación, que representa pérdidas esperadas anuales de **\$ 22.651**, y no se evidencia afectaciones por avenidas torrenciales. Con un total de **\$ 196.156.145** pérdidas anuales esperadas teniendo en cuenta todos los eventos mencionados.

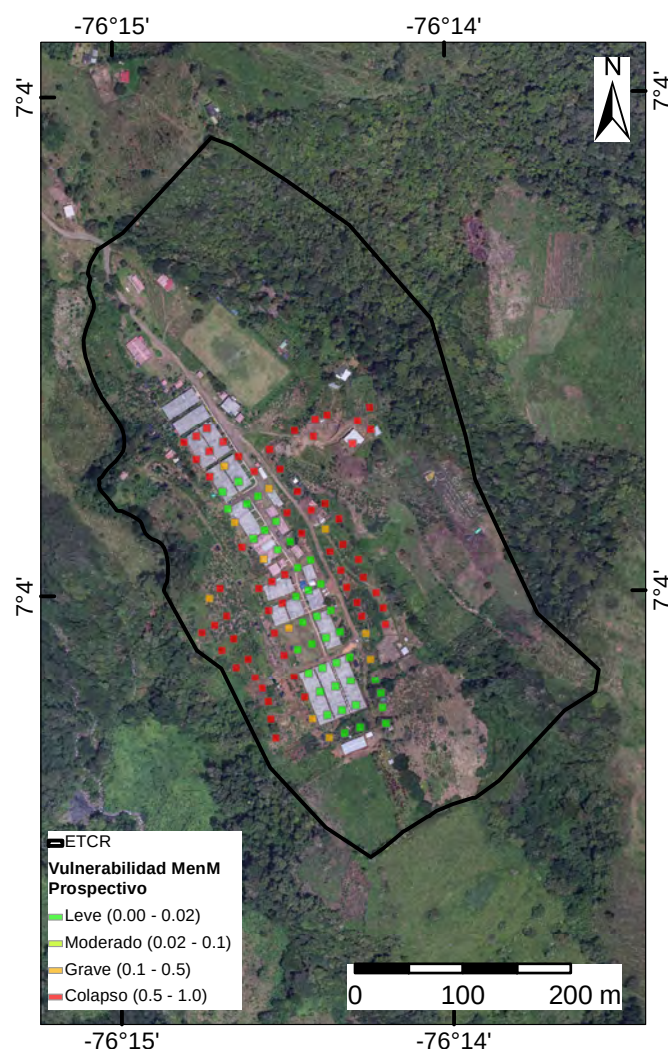


Figura 236: Vulnerabilidad por movimientos en masa de viviendas proyectadas en el antiguo ETCR Llano Grande

Al comparar el escenario actual y proyectado, se puede evidenciar que para los eventos de movimientos en masa e inundación se presenta un aumento en la cantidad de viviendas expuestas que son afectadas en el escenario proyectado, mientras que para avenidas torrenciales se redujo completamente la exposición. Con respecto a los costos asociados a las pérdidas esperadas anuales son mayores las estimadas en el riesgo prospectivo. Cabe destacar, que la escala comparativa entre los escenarios difiere en el número de viviendas ubicadas en el espacio territorial, se evalúan 46 y 108 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

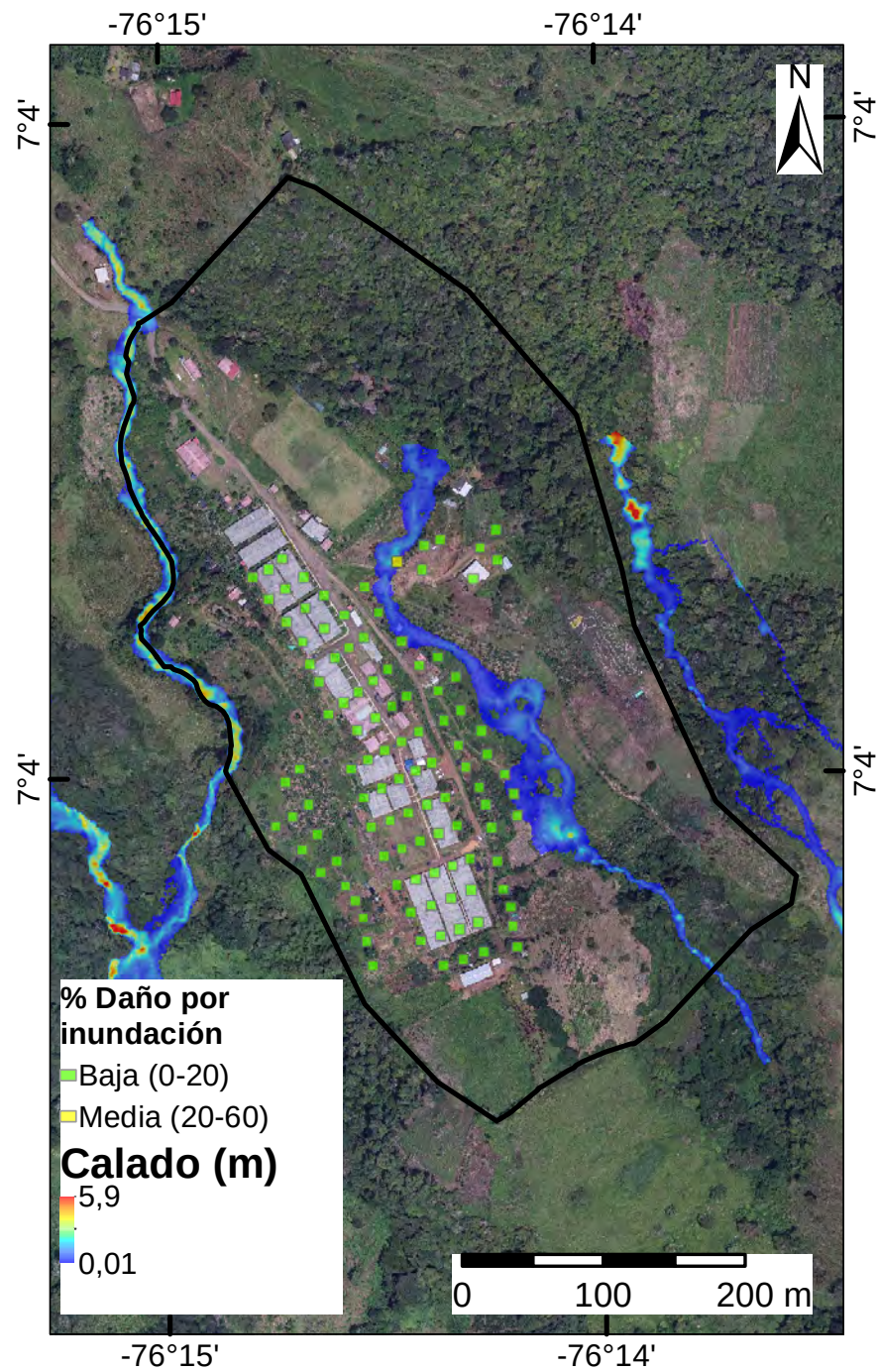


Figura 237: Daño por inundación en viviendas proyectadas en el antiguo ETCR de Llano Grande anuales.

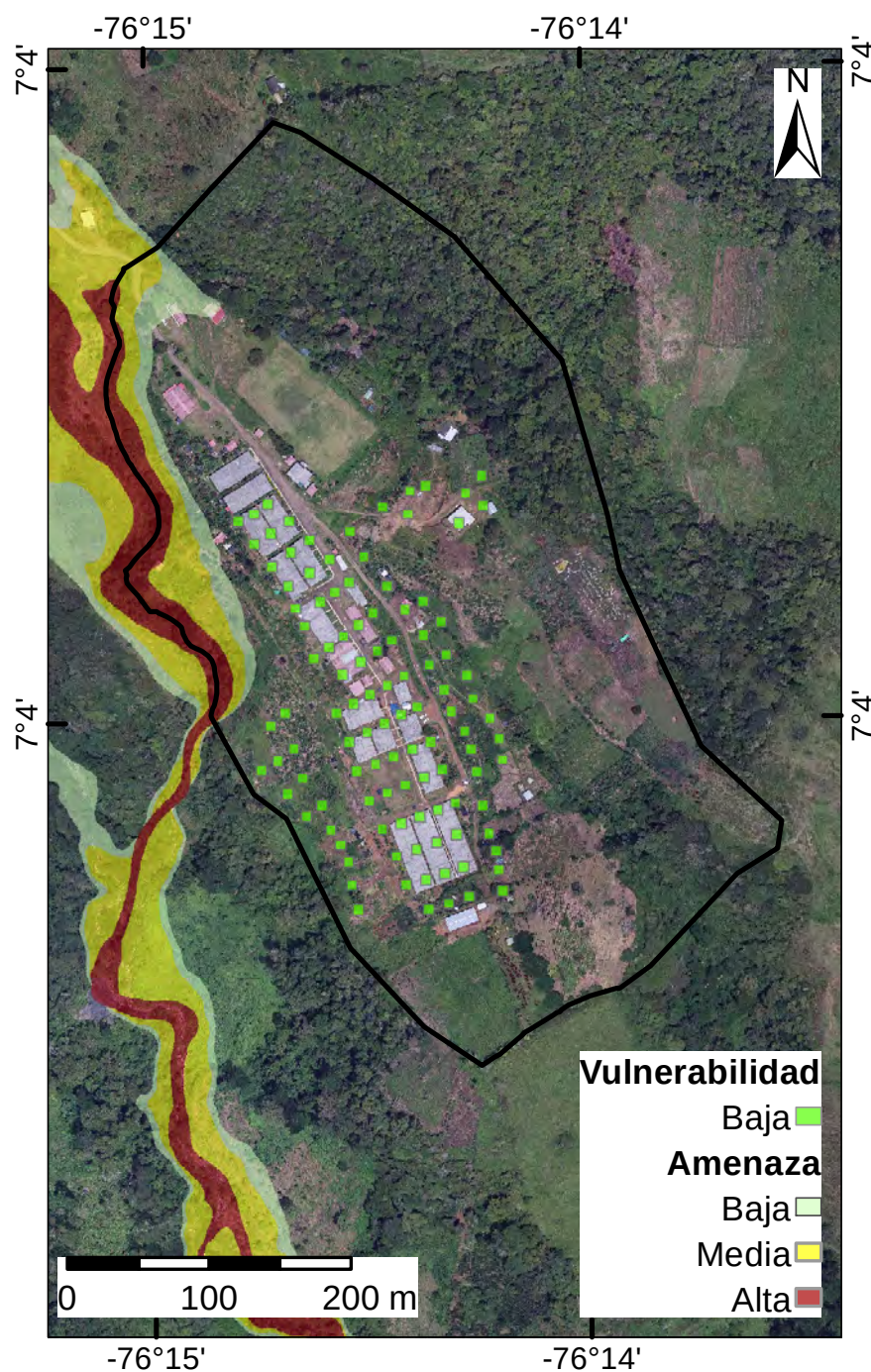


Figura 238: Vulnerabilidad por avenidas torrenciales en viviendas proyectadas en el antiguo ETCR de Llano Grande

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

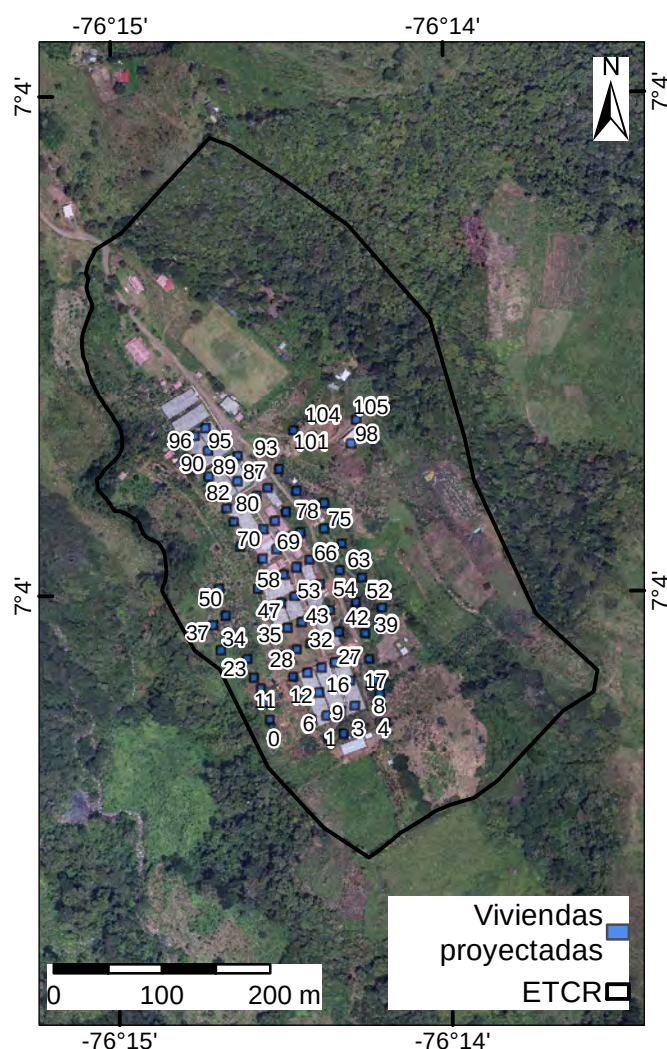


Figura 239: Viviendas proyectadas dentro del antiguo ETCR Llano Grande

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 Llano Grande, tomando como referencia los siguientes valores, en la Figura 112, permite evidenciar un riesgo medio por los factores amenazantes de movimiento en masa –sobre todo-, avenida torrencial e inundación. Para el caso de estos dos últimos factores amenazantes –avenida torrencial e inundaciones-, la probabilidad de ocurrencia es más bien bajo, al igual que el potencial del daño es de medio a bajo; sin embargo, como las fragilidades de la población son altas, el riesgo aumenta. En el caso de los movimientos en masa la situación es diferente, y si bien, debido a criterios metodológicos, el resultado de la evaluación también es una valoración de riesgo medio, es importante tener presente que la probabilidad de ocurrencia, al igual que su potencial de daño en este antiguo ETCR por las condiciones geológicas implica la construcción de las medidas estructurales para evitar que se afecte el futuro proyecto de vivienda. De igual modo, es importante avanzar en gestionar las altas fragilidades de la población que allí habitará, no sólo con el fin de evitar que prácticas actuales se configuren en detonantes de los factores amenazantes, sino para establecer otras medidas no estructurales como los sistemas de alerta tempranos que eviten emergencias en el largo plazo, de igual modo, avanzar en la formación a los habitantes en las áreas de condiciones de amenaza para evitar que una futura expansión del poblado –construcciones- se realice en ellas.

Tabla 112

Rangos para valoración del riesgo			
0-3	3, 1-5, 9	6-8, 9	9-11, 9
Bajo	Medio	Medio-alto	Alto

	Probabilidad 0-0,3 remoto - 0,4-0,6 ocasional - 0,7-0,8 moderado 0,9-1 frecuente	Impacto 0-0,3 Marginal - 0,4-0,6 Grave - 0,7-0,8 Crítica - 0,9-1 Desastrosa						Fragilidad 0-0,3 Baja - 0,4-0,7 Medio - 0,8 - 1 Alta				Capacidad 0-0,3 Altas - 0,4-0,7 Medio - 0,8 - 1 Baja				Nivel de Riesgo
		Humano	Ambiental	Viviendas	Productivo	Equipamiento	Evaluación	Social	Económica	Estructural	Evaluación	Organizativa	Gestión y Cooperación	Apropiación	Evaluación	
Amenaza																
AVENIDAS TORRENCIALES	0,1	0,2	0,5	0,5	0,5	0,1	1,8	0,5	0,1	0,8	1,4	0,1	0,4	0	0,5	3,8
INUNDACIONES	0,1	0,2	0,5	0,2	0,5	0,1	1,5	0,5	0,1	0,8	1,4	0,1	0,4	0	0,5	3,5
MOVIMIENTO EN MASA	0,4	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	3,3	0,5	0,1	0,8	1,4	0,1	0,4	0	0,5	5,8

Figura 240

16.4.1. Matriz de riesgo

En conclusión, además de las medidas estructurales necesarias relacionadas con los movimientos en masa, que valga aclarar no afectan el proyecto de vivienda de corto plazo, es de suma importancia la implementación de medidas no estructurales, teniendo en cuentas las altas fragilidades de los habitantes que pueden generar futuros riesgos al considerar una ampliación del poblado con nuevas construcciones o implantación de proyectos productivos. En este sentido la información y formación sobre las condiciones territoriales son centrales.

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 con el Decreto 1077 del 2015 “*Determinación de medidas de intervención. Con base en los resultados de los estudios básicos, se deben determinar las medidas de mitigación no estructurales orientadas a establecer el modelo de ocupación del territorio y las restricciones o condicionamientos para el uso del suelo cuando sea viable, mediante la determinación de normas urbanísticas*” se determina las medidas de mitigación no estructurales orientadas a establecer el modelo de ocupación del territorio y las restricciones para el uso del suelo. Además, en el Artículo 20 (medidas de intervención) menciona que las medidas no estructurales son aquellas orientadas a regular el uso, la ocupación y el aprovechamiento del suelo, sistemas de alertas tempranas, socialización y apropiación cultural de los principios de responsabilidad y precaución.

Las implementaciones de las medidas no estructurales ayudan a la máxima reducción del riesgo, especialmente la pérdida de vidas. Por ello, las medidas no estructurales buscan la reducción de la vulnerabilidad de la población en riesgo a partir del planeamiento y la gestión llevados a cabo antes, durante y después de un evento. Las medidas no estructurales son de especial importancia para que en conjunto con las medidas estructurales se pueda mitigar el riesgo de una manera efectiva y balanceada.

La dos medias 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, y De Vita, 1998). Los umbrales de lluvia buscan definir una cantidad de lluvia acumulada en cierto tiempo para la cual ocurren la mayor cantidad de eventos y de esta forma utilizarse para anticipar o pronosticar su ocurrencia. Según (Guzzetti, Peruccacci, y Rossi, 2007) los umbrales críticos de lluvia para predecir eventos de movimientos en masa se pueden hallar con dos metodologías:

- Métodos empíricos o estadísticos aplicados ampliamente a debido a su fácil implementación (Aristizábal, González, Montoya, y Vélez, 2011; Glade, 2000).
- Utilizando modelos físicos numéricos que son más complejos de definir y aplicar.

La metodología para definir los umbrales es importante resaltar las siguientes definiciones. El término Lluvia Acumulada (LA), o lluvia a corto plazo, se refiere a la cantidad de lluvia caída en los días inmediatamente previos a la ocurrencia del evento; por otro lado, la Lluvia Acumulada Antecedente (LAA), o lluvia de largo plazo, representa la cantidad de lluvia acumulada en los días precedentes a los definidos como Lluvia Acumulada (LA) (Aristizábal y cols., 2011).

Luego de conocer cuales son las condiciones de lluvia en el área de estudio, se procede a calcular los datos de la Lluvia Acumulada y la Lluvia Acumulada Antecedente para CHIRPS e IDEAM, a escala diaria para las estaciones del IDEAM y para CHIRPS, se evaluarán los umbrales a escala mensual, esto último se debe a que la correlación más alta entre los datos satelitales y del IDEAM se presenta a escala mensual, como se observa en la Figura 18.

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 la estación 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 la Figura 241, se puede observar diferentes concentraciones, al inicio más densidad de puntos y secuencialmente se va perdiendo la densidad de estos, las 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 adicionalmente, la lluvia que se ha venido acumulando que podrían ocasionar el desencadenamiento de procesos morfodinámicos.

En la Figura 241 se observa que las zonas son definidas de la siguiente manera: alerta verde (baja) oscila entre 0 y 20 mm/día para lluvia acumulada y para lluvia acumulada antecedente 0 a 400 mm en 30 días de acumulado, para alerta amarilla oscila entre 20 y 45 mm/día para lluvia acumulada y para lluvia acumulada antecedente entre 400 y 500 mm en 30 días de acumulado, para alerta naranja oscila entre 45 y 60 mm/día para lluvia acumulada y para lluvia acumulada antecedente oscila entre 500 y 650 mm en 30 días de acumulado, valores mas altos que los anteriores son alerta roja.

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

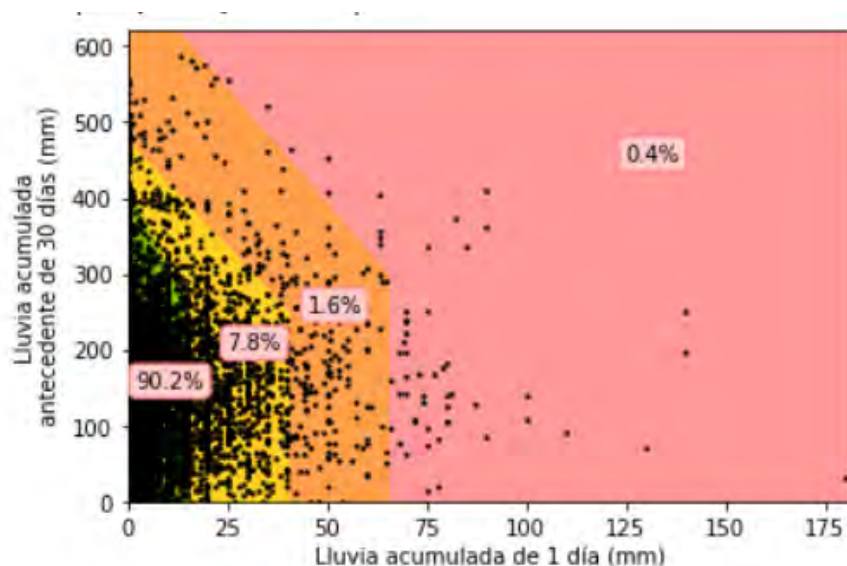


Figura 241: Umbral de lluvia estación Fuemia IDEAM

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 cuenca de la quebrada Chimiadó. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 242, donde se compara la lluvia acumulada de un mes contra la lluvia acumulada antecedente de 3 meses.

En la Figura 242 las zonas son definidas de la siguiente manera: alerta verde oscila entre 0 y 1000 mm/mes para lluvia acumulada y para lluvia acumulada antecedente 0 a 3500 mm en 3 meses de acumulado, para alerta naranja oscila entre 1000 y 1500 mm/mes para lluvia acumulada, valores superiores a los anteriores son clasificados como alerta 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, 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 disseminación de la información simple, sintética y confiable, y (iv) el desarrollo de estrategias de respuesta combinadas con educación y conocimiento en las comunidades (Canli, 2018).

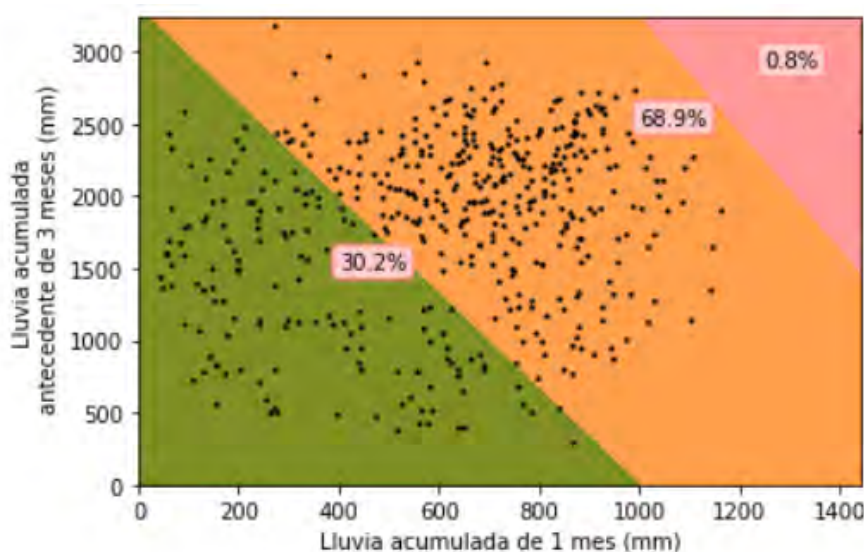


Figura 242: Umbral de lluvia para satélite CHIRPS cuenca Chimiadó

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.

El antiguo ETCR Llano Grande según sus condiciones normativas y de amenazas es susceptible para estrategias como la definición de espacio público tanto libre como edificado, y zonas productivas que apoyen los proyectos de la comunidad. El área distribuida para este espacio se observa en la Tabla 113.

Tabla 113: Áreas aprovechamiento del suelo

Descripción	Área m^2	Estrategia
Área bruta antiguo ETCR	175264,46	
Restricciones normativas	50446,43	
Área neta antiguo ETCR	124818,03	
Edificable vivienda	36851,42	
Amenaza por mvto en masa alta	12481,80	Espacio público libre
Espacio adicional edificable	2330,54	Espacio público equipamiento
Espacio adicional no edificable	85623,59	Zonas productivas

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 243, se dan a conocer las obras recomendadas para su ejecución.

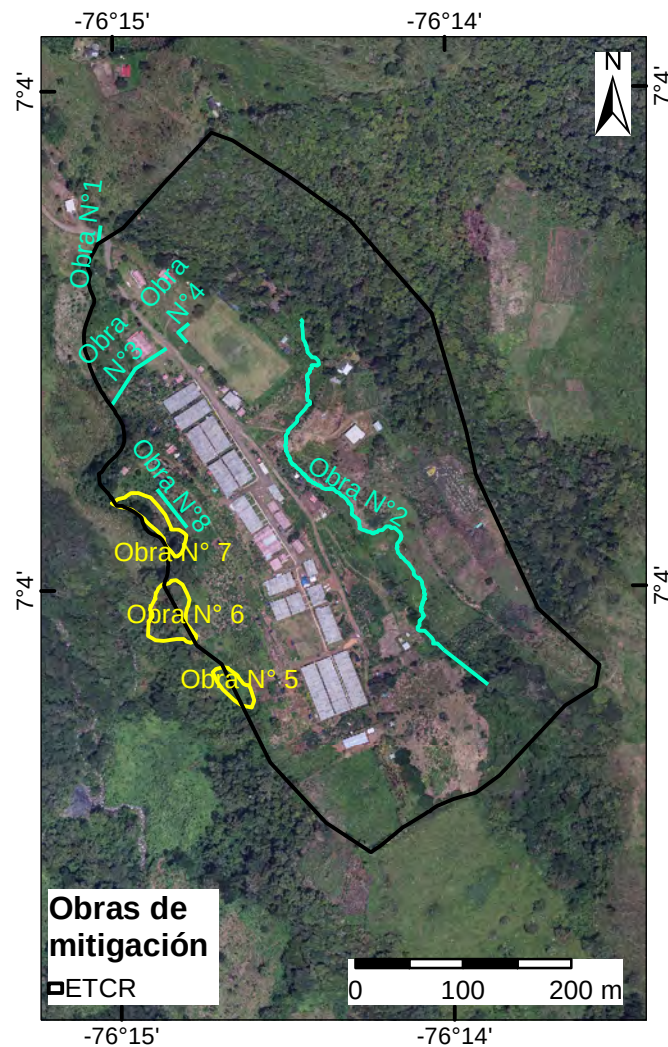


Figura 243: Ubicación obras de mitigación y remediación

17.2.1. Obra N°1 - *Box culvert*

Como propuesta para la mitigación de inundaciones, se propone darle mayor capacidad hidráulica a la obra de paso ubicada en la vía de acceso desde el noroeste al antiguo ETCR y que actualmente generaría desbordamiento ante la creciete asociada a un período de retorno de 500 años. Se propone una obra con dimensiones suficientes para evacuar una creciete con período de retorno

de 100 años y teniendo en cuenta el volumen de sólidos que potencialmente transiten en el evento.

Se propone como medida inicial, el aumento del ancho de la sección de la obra de paso, a continuación en la Tabla 114 se presentan algunos parámetros y las dimensiones hidráulicas del diseño del *box culvert* planteado como medida. La Figura 244 presenta un esquema con las dimensiones del *box culvert*.

Tabla 114: Parámetros *box culvert* proyectado

Tipo de la obra	<i>Box culvert</i> rectangular
Material	Concreto
Coefficiente de rugosidad	0,013
Ancho interno (m)	4,00
Gálibo (m)	2,00
Pendiente mínima (m/m)	0,07
Caudal de diseño (m ³ /s)	25,23
Coefficiente de descarga entrada	0,80
Profundidad de flujo	2,00
Área mojada (m ²)	8,00
Perímetro mojado (m)	8,00
Radio hidráulico (m)	1,00
Velocidad media de flujo (m/s)	2,00
Caudal resultante (m ³ /s)	25,60
Suficiente	Sí

- 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.
- Se recomienda la construcción obra protectora del canal a la salida del *box culvert*, pues en éste se acelera el flujo y provocará erosión, puede considerarse muro en concreto o muro flexible tipo gavión con malla recubierta en PVC.
- 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.
- Es importante considerar las aletas de la obra para que esta capte todo el flujo de entrada.

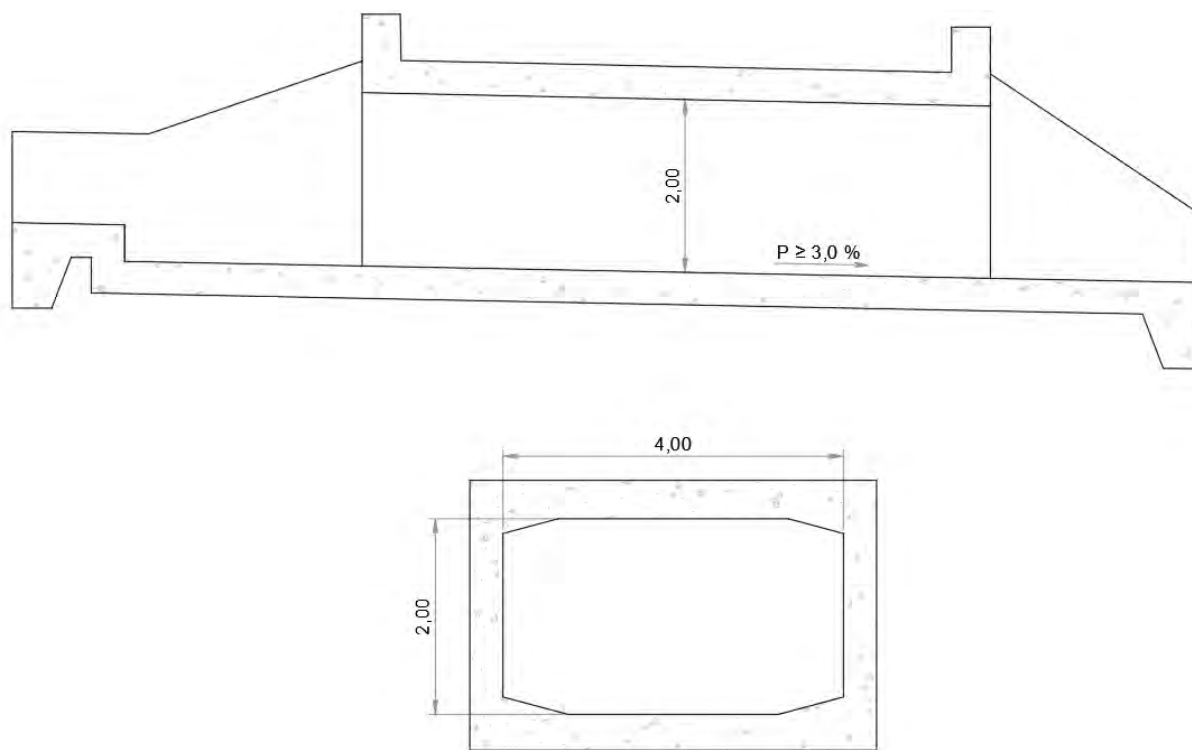


Figura 244: Esquema de sección transversal y frontal de *box culvert*

17.2.2. Obra N°2 - Canal #1

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. En el antiguo ETCR es necesaria la construcción de canal abierto para conducir la quebrada denominada como **NN1**. 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.

El canal debe contar con una pendiente 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.

Como obra anexa se requiere la construcción de canal escalonado (rápida) en la parte final del canal el cual se conecta con el canal natural en dicha zona, se presenta esquema del canal escalonado donde se considera un valor de $h=0,5m$ y

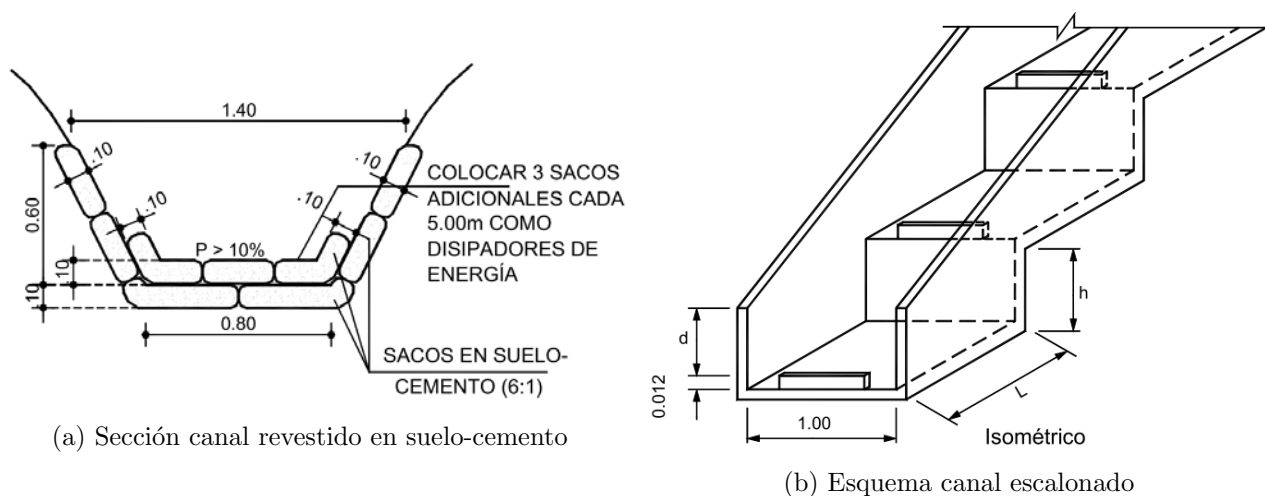


Figura 245: Canal #1(Suárez, 2001)

$L=1,5\text{m}$ y una longitud en planta de 50m. La conexión canal escalonado-natural debe ser con piso duro y enrocado para evitar la socavación.

17.2.3. Obra N°3 - Canal #2

Para el canal #2 se propone también un canal trapezoidal en sacos de suelo-cemento, pero de menor dimensión (Figura 246). Este canal se construye con la intención de evacuar aguas de la vía en ese punto y construcciones aledañas.

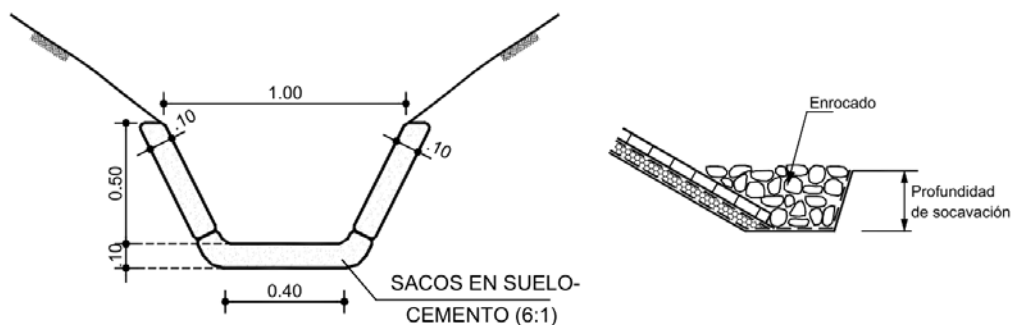


Figura 246: Sección canal revestido en suelo-cemento (Suárez, 2001)

En este canal agregar disipadores cada 10m y al final agregar una capa de enrocado de 1,5m de longitud, 1,5m de ancho y 0,20m de espesor con la intención de reducir la socavación al final del canal.

17.2.4. Obra N°4 - Muro flexible (Gaviones)

Son estructuras flexibles que actúan por gravedad y soportan movimientos verticales y horizontales. Consisten en cajas prismáticas de malla metálica gal-



Figura 247: Zona de obras N°2 y 3

vanizada rellenas de fragmentos de roca, usualmente se usan cajas de 2m x 1m x 1m unidas por amarres de alambre y no requieren de cimentaciones profundas. Son permeables y deformables, la deformación depende en gran medida del peso de la estructura, con buen desempeño para el control de erosión, estabilidad y caída de rocas.

En la Figura 248 se presentan el esquema recomendado para muro flexible tipo gaviones de 4 niveles a ser implementado según la Figura 243, el muro se localiza tipo escuadra en la esquina NW de la cancha con una altura sobre el terreno de 3,5m.

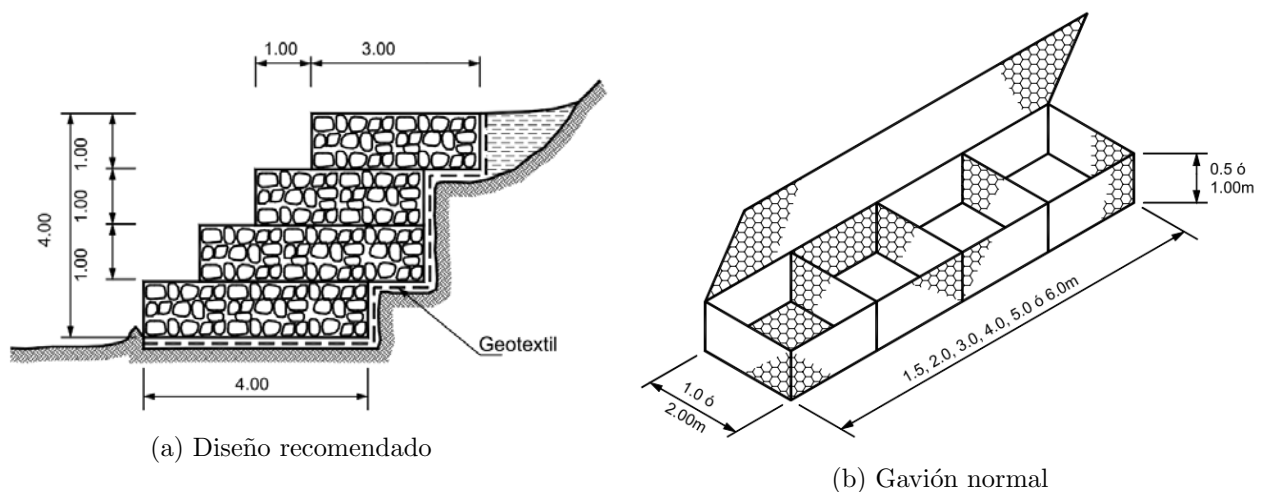


Figura 248: Esquema muro flexible tipo gavión (Suárez, 2009)

Durante su construcción debe manejarse las aguas que drenan por la ladera mediante canales plásticos provisionales y usar una cobertura superficial

(plástico) para evitar erosión y condiciones que afecten la estabilidad el mismo. Durante el proceso constructivo debe contarse con personal profesional especializado para supervisión continua de la tarea.



Figura 249: Zona muro flexible

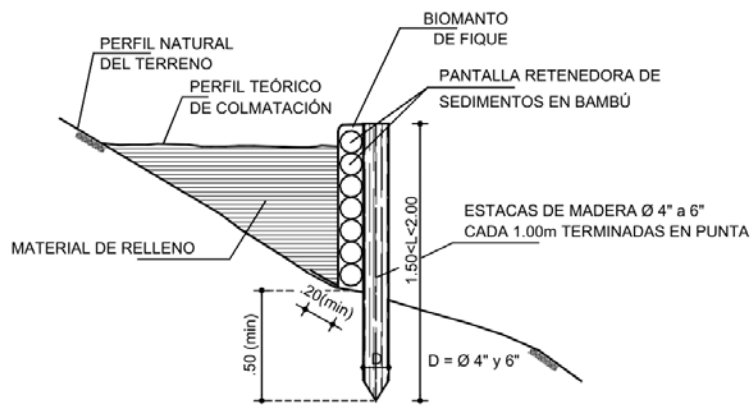
17.2.5. Obra N°5, 6 y 7 - Trinchos

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 $\phi = 10cm$ 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.

17.2.6. Obra N°8 Subdrenes horizontales

Los subdrenes horizontales 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



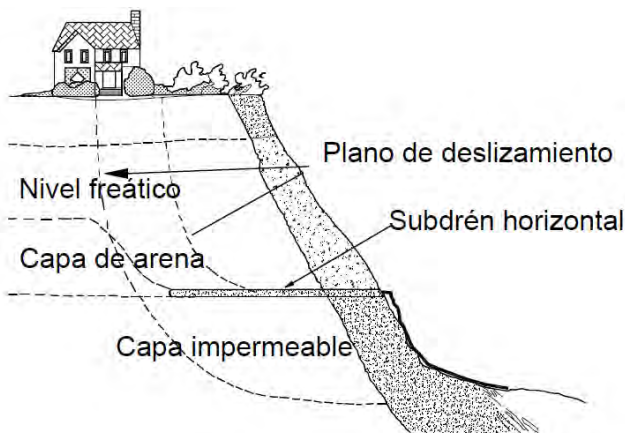
(a) Diseño recomendado (Suárez, 2001)



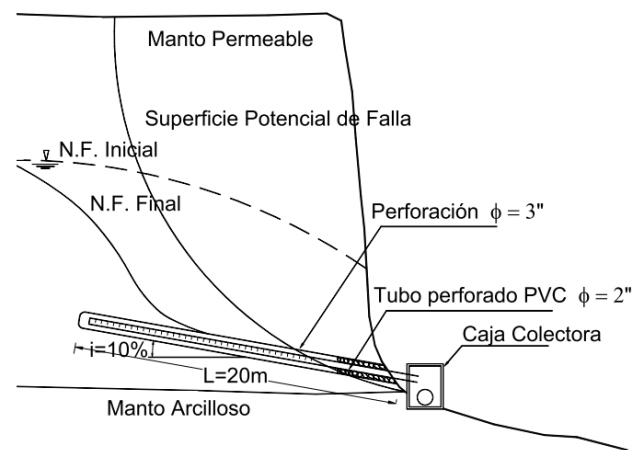
(b) Ejemplo (Revista occidental, 2015)

Figura 250: Esquema trinchos

inclinación ($5^{\circ} - 10^{\circ}$). Estos se encuentran recubiertos de geotextil con la intención de evitar el ingreso de materia finogranular y sobresalen de la superficie cerca de 30cm .



(a)



(b)

Figura 251: Esquema uso de subdrenes horizontales (Suárez, 2009)

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 C4. En la Figura 243, se presenta la ubicación, los subdrenes deben ser perpendiculares a la línea indicada, su separación varía entre 10 y 15m ((Suárez, 2009)), con una longitud de 30m. En la Figura 251 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 el silencio.

Referencias

- Aristizábal, E., González, T., Montoya, J., y Vélez, D. (2011). Análisis de umbrales empíricos para el pronóstico de movimientos en masa. *Revista EIA*, 15, 95–111.
- Canli, . L. B., E. (2018). Spatially distributed rainfall information and its potential for regional landslide early warning systems. *Natural Hazards*.
- Glade, C. M. . S. P., T. (2000). Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical “ antecedent daily rainfall model.”. *Pure & Applied Geophysics*, 157(6–8), 1059.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., y Rossi, . S., M. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98(3–4), 239–267.
- Reichenbach, P., Cardinali, M., y De Vita, . G. F., P. (1998). Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the tiber river basin (central italy). *Environmental Geology*, 35(2), 146–159.
- 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/>
- Suárez, J. (2001). *Control de erosión en zonas tropicales* (Universidad Industrial de Santander, Ed.). Descargado de <https://www.erosion.com.co/control-de-erosion-en-zonas-tropicales.html>
- Suárez, J. (2009). *Deslizamientos. Volumen II: Técnicas de remediación* (U. I. de Santander, Ed.). Descargado de <https://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-ii-tecnicas-de-remediacion.html>
- Thiebes, . G. T., B. (2016). Landslide early warning systems—fundamental concepts and innovative applications. *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*.

Parte V

Esquema de aproximación espacial

Capítulo 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 252 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 retiros de fuentes hídricas y áreas protectoras donde el límite marcado en amarillo es de carácter nacional y la demás se encuentra actualmente en actualización por parte de la alcaldía municipal de Dabeiba, dando así la posibilidad de contar, en el momento del proyecto arquitectónico, con esta área. 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 253 se muestra el cruce de amenaza de detalle estudiadas en

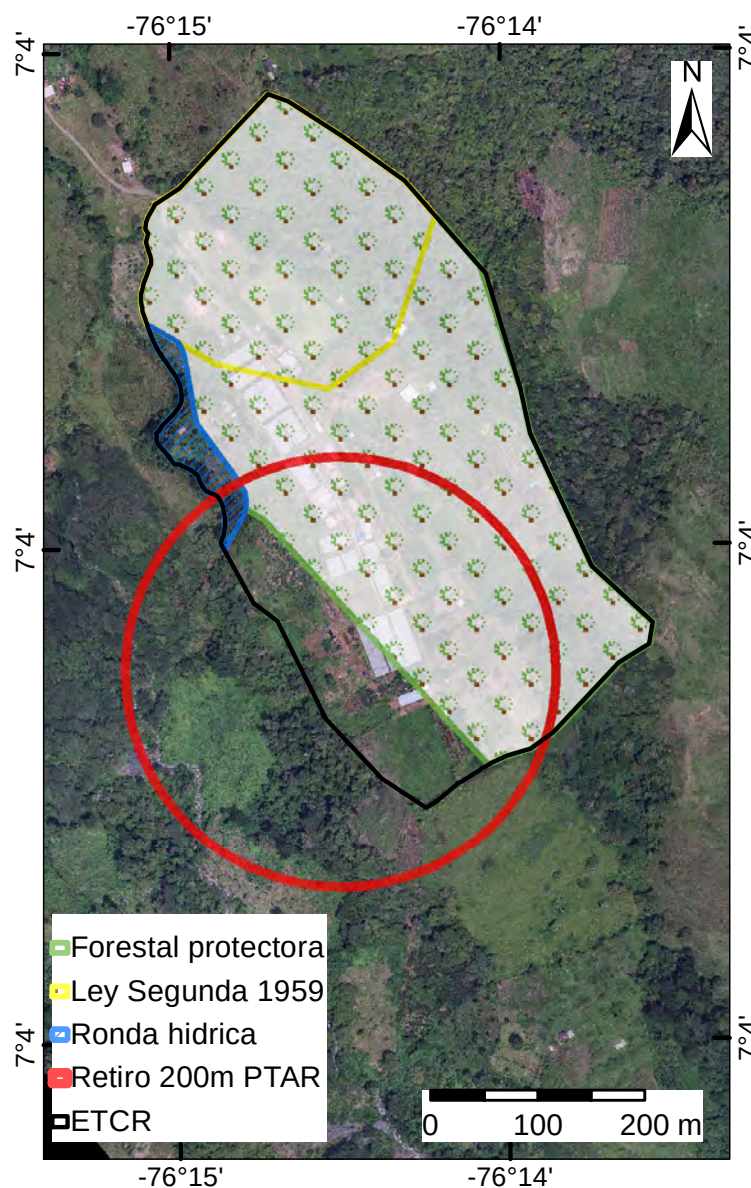


Figura 252: Restricciones normativas

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 ultima las zonas priorizadas para realizar la propuesta de ocupación.

Con el cruce de estos elementos normativos y de amenaza se cuenta con un área neta urbanizable de $39174,67 \text{ m}^2$, en la cual se realizará la propuesta para los 109 predios, vías y posibles usos asociados. Se realiza un análisis de infraestructuras como instituciones educativas tal como se presenta en la Tabla ??, que muestra la cantidad de instituciones educativas en relación con la distancia en

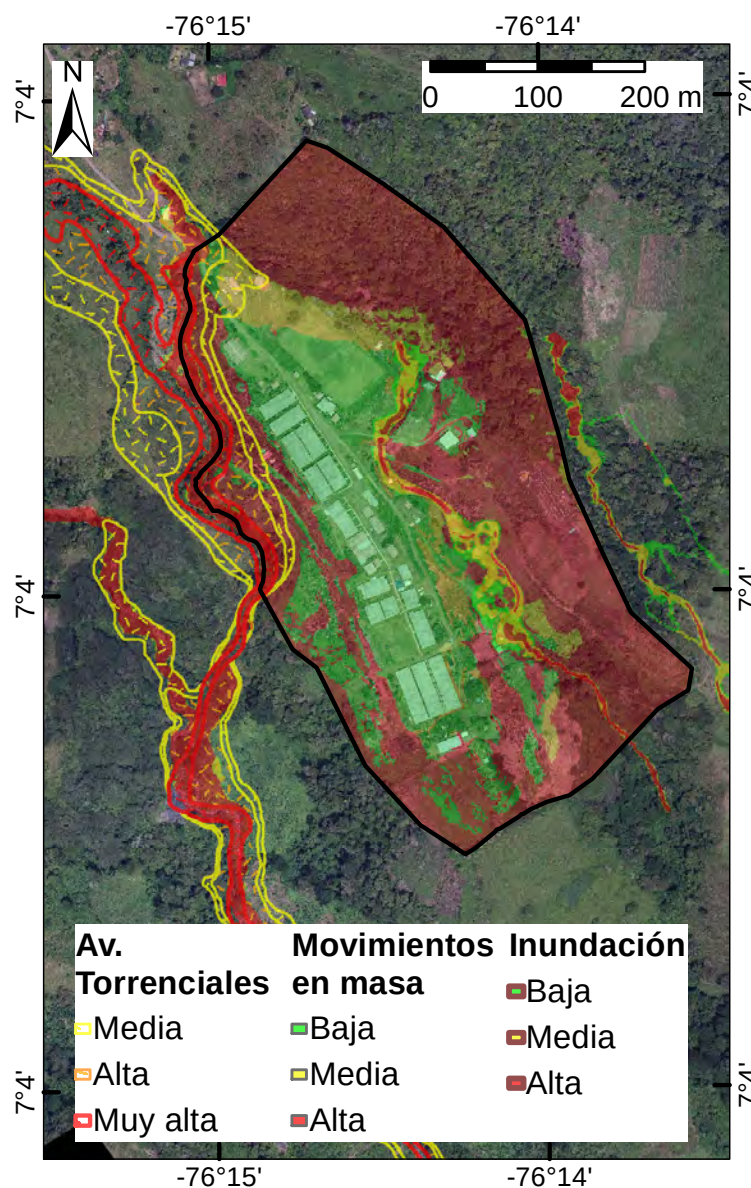


Figura 253: Evaluación de amenazas

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 estudiadas con mayor detalle en fases siguientes.

Para Llano Grande se cuenta con 73 instituciones que varían entre educación preescolar, primaria y secundaria en una radio de 20 km, de las cuales, 2 se encuentran a una distancia menor a 2.5 km. Las actividades productivas principales giran en torno al ecoturismo y el cuidado de gallinas.

Tabla 115: Add caption

ETCR		Llano grande
<i>Área total</i>		175264,46
<i>Número de viviendas</i>		109
<i>Población</i>		163
<i>Instituciones educativas</i>	0 - 1 km	1
	1 - 2,5 km	1
	2,5 - 10 km	26
	10 - 20 km	45
	TOTAL	73
<i>Unidades productivas</i>	Ecoturismo. Galpón de gallinas	
<i>Equipamientos existentes</i>	Saló comunitario, Hostal, Administración, Bodega, Puesto de salud, Comedor	

Tras los análisis mencionados, se presenta a continuación los elementos propuestos para el antiguo ETCR como equipamientos, vías y viviendas.

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 m^2 por habitante. Para Llano Grande, teniendo en cuenta una población de 163 habitantes, el centro comunitario tiene $456,4 \text{ m}^2$

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" o en "U", que permite diferentes implantaciones en los predios de acuerdo con las necesidades particulares que deben ser evaluadas y ajustadas en etapas de diseño. (<https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/fichas-tecnicas-vivienda-nueva-vivienda-rural.pdf>) Figura 254.

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 255 se muestra el planteamiento espacial de las vías y senderos peatonales para el antiguo ETCR Llano Grande con 618,8 m de vía vehicular y 775 m de senderos peatonales.

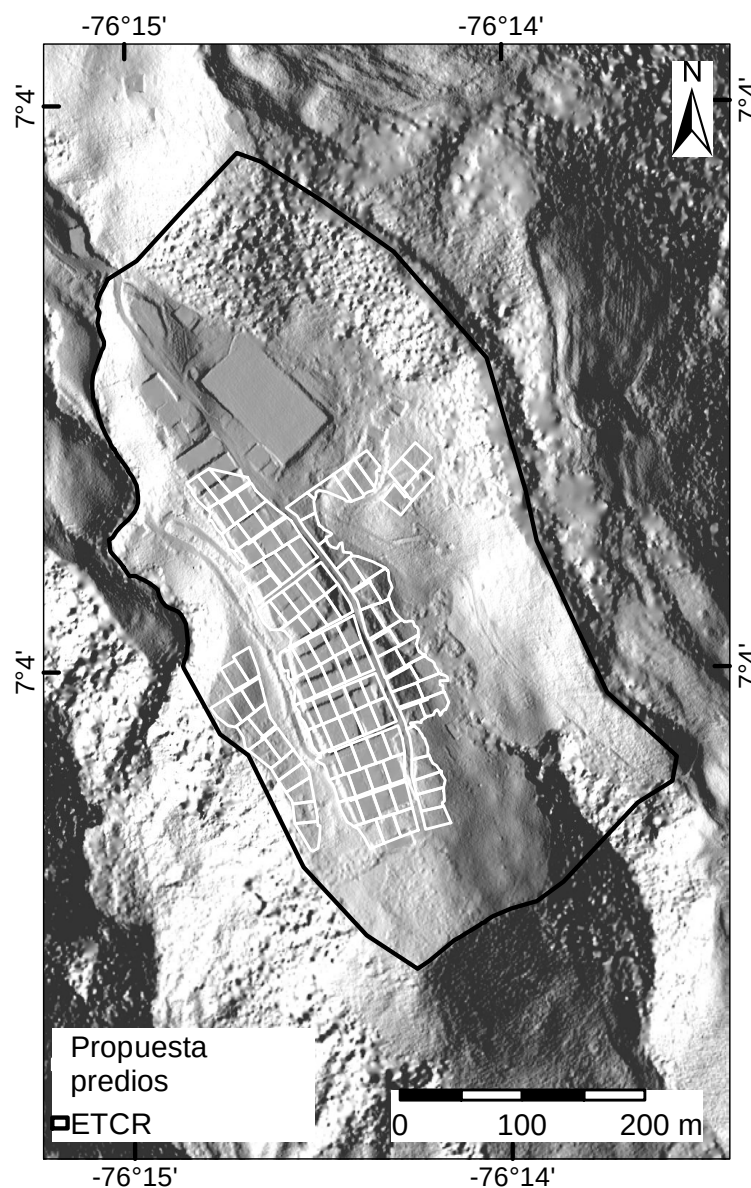


Figura 254: Propuesta de predios

18.2. Borrador norma urbanística objeto de ajuste en Dabeiba

Con base en el análisis de normativa urbanística del PBOT vigente del Municipio de Dabeiba, la cantidad de viviendas demandadas en cada antiguo ETCR y el ejercicio de cabidas de lotes y edificaciones realizadas sobre áreas netas urbanizables, se presentan la redacción 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

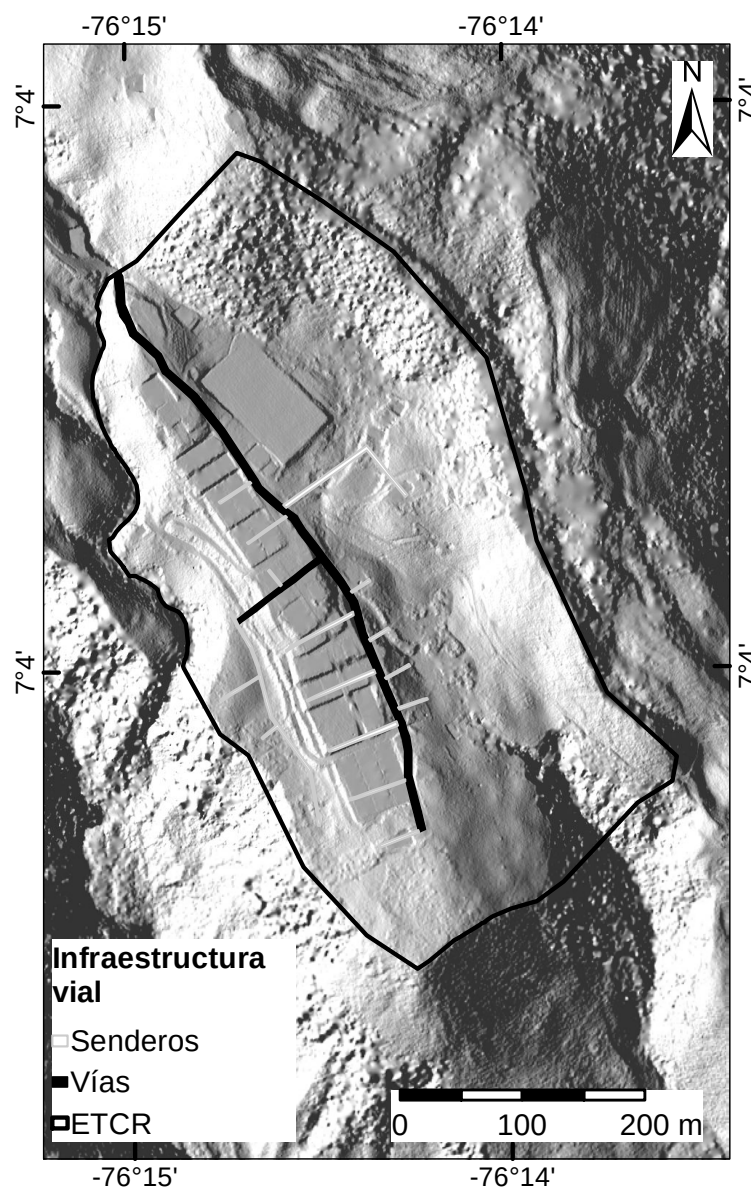


Figura 255: Infraestructura vial propuesta

el POT en el componente respectivo y de acuerdo a su jerarquía.

18.2.1. Componente general

Titulo XX. Clases de suelo

Artículo 1°. Suelo Suburbano

Adiciónese al artículo 183 del Acuerdo 24 de 2012 el siguiente inciso:

También hace parte del suelo suburbano los terrenos de los Antiguos Espacios Territoriales de Consolidación y Restauración.

Los diferentes suelos rurales de categoría suelo suburbano se delimitan en el Mapa xxx. Suelos suburbanos

Artículo 2°. Umbral de suburbanización

Modifíquese el artículo 184 del Acuerdo 24 de 2012 el cual quedará así:

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 Dabeiba participará de la plusvalía causada por los siguientes hechos generadores:

1. La consideración de parte del suelo rural como suburbano-

El porcentaje de participación en las plusvalías será el 30 % del incremento del valor del suelo causado por los hechos generadores

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 estas.
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 6 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: 1,50 metros c/u. sección pública mínima: 7 metros. Antejardín: 10 metros y retiro mínimo: 13,50 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: 1,50 metros c/u. Sección pública mínima: 7 metros. Antejardín: 10 metros. Retiro mínimo: 13,50 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: 1,50 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 e al artículo 200 del Acuerdo 24 de 2012 el cual quedará así:

Titulo XX. Aprovechamiento urbanístico

Artículo 9°. 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 se define en Tabla 117:

Titulo XX. Obligaciones urbanísticas

Artículo 10°. De las obligaciones urbanísticas

Adiciónese e al artículo 200 del Acuerdo 24 de 2012 el cual quedará así:

Para las parcelaciones se establece las siguientes cesiones urbanísticas, Tabla 118.

Titulo XX. Normas de Parcelación

Artículo 11°. Área mínima de lote en suelos suburbanos

Adiciónese e al artículo 200 del Acuerdo 24 de 2012 el cual quedará así:

Tabla 116: uso del suelo

Uso principal	Uso compatible o complementario	Uso condicionado o restringido	Uso Prohibido
Vivienda, agricultura	Comercio minorista cotidiano (actividades de primera necesidad que permitan satisfacer las necesidades básicas de la comunidad). Servicios comunitarios y mercantiles de baja intensidad (Peluquerías, restaurantes, cafeterías, alojamiento, entre otros). Agricultura (ERA) unidad de medida hortícola, y de mediana ocupación. Practicas agropecuarias de especies menores y escalonadas. Centros de acopio de almacenamiento o mercados verdes y logística de apoyo a la economía y cultura local. Servicios de turismo sostenible. Equipamientos comunitarios, básicos sociales, acorde con el nivel de centralidad establecida. Ganadería intensiva bovina, porcina, caprina y similares, aves de corral. Piscicultura. Plantaciones forestales.	Los depósitos de vehículos de transporte público, industria artesanal, pequeña y mediana siempre y cuando la norma urbanística así lo permita y de acuerdo con el Protocolo Ambiental y Urbanístico. Minería.	Industria mediana y pesada. Estaciones de servicios Desarrollos comerciales de “grandes superficies”, Bodegas y Depósitos de Materiales de Construcción. Servicios financieros.

Tabla 117: Densidad habitacional

Uso del suelo	Densidad
Usos en suelo suburbano	7 viv/ha

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

Tabla 118: Cesiones urbaníticas

CÓDIGO	COBERTURA BOSCOSA	CESIONES		
		ESPACIO PÚBLICO (suelo)	EQUIPAMIENTOS (construcción)	
			VIVIENDA m^2	OTROS USOS %
xxxxx	15 % del área neta del lote resultantes de proceso de parcelación	5 % Área bruta del lote objeto de parcelación	20 m^2 por cada destinación de vivienda	1 % del área total construida

suelos suburbanos es de 300 m^2 .

Artículo 12°. Frente mínimo de lote

Adiciónese e al artículo 200 del Acuerdo 24 de 2012 el cual quedará así:

El frente mínimo en suelos suburbanos se establece en 20 metros.

Artículo 13°. Antejardines

Adiciónese e al artículo 200 del Acuerdo 24 de 2012 el cual quedará así:

Todo lote producto de procesos de parcelación o subdivisión generará un antejardín de 4 metros sobre el acceso del inmueble los cuales permanecerán en cobertura vegetal y no podrá ser reemplazado por piso duro.

Artículo 14°. Cerramientos de lote

Adiciónese e al artículo 200 del Acuerdo 24 de 2012 el cual quedará así:

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 15°. Área mínima vivienda

Adiciónese e al artículo 200 del Acuerdo 24 de 2012 el cual quedará así: Se establece un área mínima de vivienda de 45 m^2 .

Artículo 25°. Área de Local

Adiciónese e al artículo 200 del Acuerdo 24 de 2012 el cual quedará así: El área mínima de local comercial se establece en 24 m^2 y un máximo de 250 m^2 .

Artículo 16°. Iluminación y ventilación

Todo espacio de la edificación tendrá ventilación directa a través de patios, fachadas y vacíos.

Artículo 17°. 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 siguientes requisitos mínimos de acabados:

1. Existencia física de Techo, muros en obra gris, puertas y ventanas sobre fachadas, patios y vacíos.
2. Existencia de cocina, salón múltiple y 2 habitaciones.
3. Baño con equipos sanitarios y ducha con enchape en piso y muros.
4. Existencia de puerta en Baños.
5. Existencia de poyo y pozuelo en cocina.
6. Existencia de lavadero en zona de ropas.

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 desarrollando en el predio actualmente y por ello debe ser evaluada su localización y pertinencia en el momento de las implantaciones arquitectónicas en la siguiente fase.

Tabla 119: Resumen costo equipamientos

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR TOTAL
<i>EQUIPAMIENTOS</i>		\$ 1.150.119.265
Cancha múltiple en césped	1	\$ 502.370.748
Centro comunitario	456,4	\$ 647.748.517

18.4. Viviendas

En la Tabla 120 se presentan los valores totales de cada tipología presentada por la Dirección de Vivienda Rural, para las 109 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	109	\$ 7.032.518.781
VISRL1	109	\$ 7.067.575.897
VISRA1	109	\$ 6.964.904.681
VISRC1	109	\$ 7.045.616.606
VISRC2	109	\$ 6.590.969.149
VISRU1	109	\$ 7.003.676.503

18.4.1. 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 pro-

yectos previos realizados por INVIAS en Colombia. (<https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/hechos-de-transparencia/analisis-de-precio-unitarios>)

Es de resaltar que actualmente el predio cuenta con una vía marcada en línea negra que se está usando para el actual plateamiento y es el acceso a la zona.

Tabla 121: Resumen costo infraestructura vial

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR TOTAL
VÍAS		\$ 661.197.049
Vías de tercer orden	0,6188	\$ 514.818.216
Caminos peatonales	775	\$ 146.378.833

18.4.2. 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 Tabla122.

El presupuesto está referenciado 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 Llano Grande se presentan 8 obras de mitigación que varían entre canales y drenes horizontales para el manejo de aguas y gaviones para el control de laderas.

Para ampliar información técnica sobre dichas obras, referirse al capítulo de Obras de mitigación.

18.5. 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.

Tabla 122: Resumen obra de mitigación

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR TOTAL
<i>OBRAS DE MITIGACIÓN</i>		\$ 337.904.936
Obra 1: manejo de aguas	1	\$ 60.377.850
Obra 2: manejo de aguas	1	\$ 64.960.436
Obra 3: manejo de aguas	1	\$ 10.311.180
Obra 4: estructural	1	\$ 74.772.884
Obra 5: estructural	1	\$ 14.552.610
Obra 6: estructural	1	\$ 54.804.510
Obra 7: estructural	1	\$ 34.678.560
Obra 8: manejo de aguas	1	\$ 23.446.906

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 123: Resumen costo tratamiento de agua

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR TOTAL
<i>TRATAMIENTO DE AGUAS</i>		\$ 1.863.242.767
Potable	1	\$ 1.133.506.619
Residual	1	\$ 729.736.148

18.6. 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 en la figura 256, la cual resumen 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: 11080.039.914 correspondiente a la tipología VISRL1.

Tipologías	Viviendas	Vías	Equipamientos	Obras de mitigación	Plantas de tratamiento	TOTALES
VISRT1	\$7.032.518.781	\$661.197.049	\$1.150.119.265	\$ 337.904.936	\$1.863.242.767	\$11.044.982.799
VISRL1	\$7.067.575.897	\$661.197.049	\$1.150.119.265	\$ 337.904.936	\$1.863.242.767	\$11.080.039.914
VISRA1	\$6.964.904.681	\$661.197.049	\$1.150.119.265	\$ 337.904.936	\$1.863.242.767	\$10.977.368.698
VISRC1	\$7.045.616.606	\$661.197.049	\$1.150.119.265	\$ 337.904.936	\$1.863.242.767	\$11.058.080.624
VISRC2	\$6.590.969.149	\$661.197.049	\$1.150.119.265	\$ 337.904.936	\$1.863.242.767	\$10.603.433.167
VISRU1	\$7.003.676.503	\$661.197.049	\$1.150.119.265	\$ 337.904.936	\$1.863.242.767	\$11.016.140.521

Figura 256: 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 LLano Grande, 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 Llano Grande es Centro Poblado Rural, sin embargo los usos del suelo y las densidades de viviendas requeridas no permiten la incorporación del ETCR al Plan de Ordenamiento Territorial vigente. Razón por la cual, el procedimiento mas ágil, que no involucre la revisión y ajuste previa del POT, es la expedición de nueva normatividad que considere como caso excepcional los ETCR dentro del marco del Proceso de Paz, y permita la implantación del ETCR.
2. En términos de saneamiento básico la oferta hídrica disponible de la Quebrada Yolombal en las coordenadas en WGS84 -76,24619 X y 7,08718 (sistema Magna Oeste 1091842,668 X y 1275549,617 y) de 25,2 l/s, con valores mínimos históricos de 8,4 l/s, abastece las demandas estimadas del ETCR para 214 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 LLano Grande cuenta con un área total de 17,5 ha; de las cuales 10,6 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 9,1 % 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 30x % 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 Llano Grande **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 realizó el levantamiento cartográfico bajo los estándares definidos por el IGAC. En el anexo 1 se encuentra:

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 APU's 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 comprensión y lectura.