Alcaldía de Medellín
Distrito de
Ciencia, Tecnología e Innovación

ANEXO





ANEXO 16

Elaboración de estudios básicos de amenaza por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales, para la inclusión de la gestión del riesgo en la revisión del POT Distrital de Medellín, Antioquia

Revisión de mediano plazo

Del Plan de Ordenamiento Territorial del

Distrito Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación de Medellín

Departamento Administrativo de Planeación

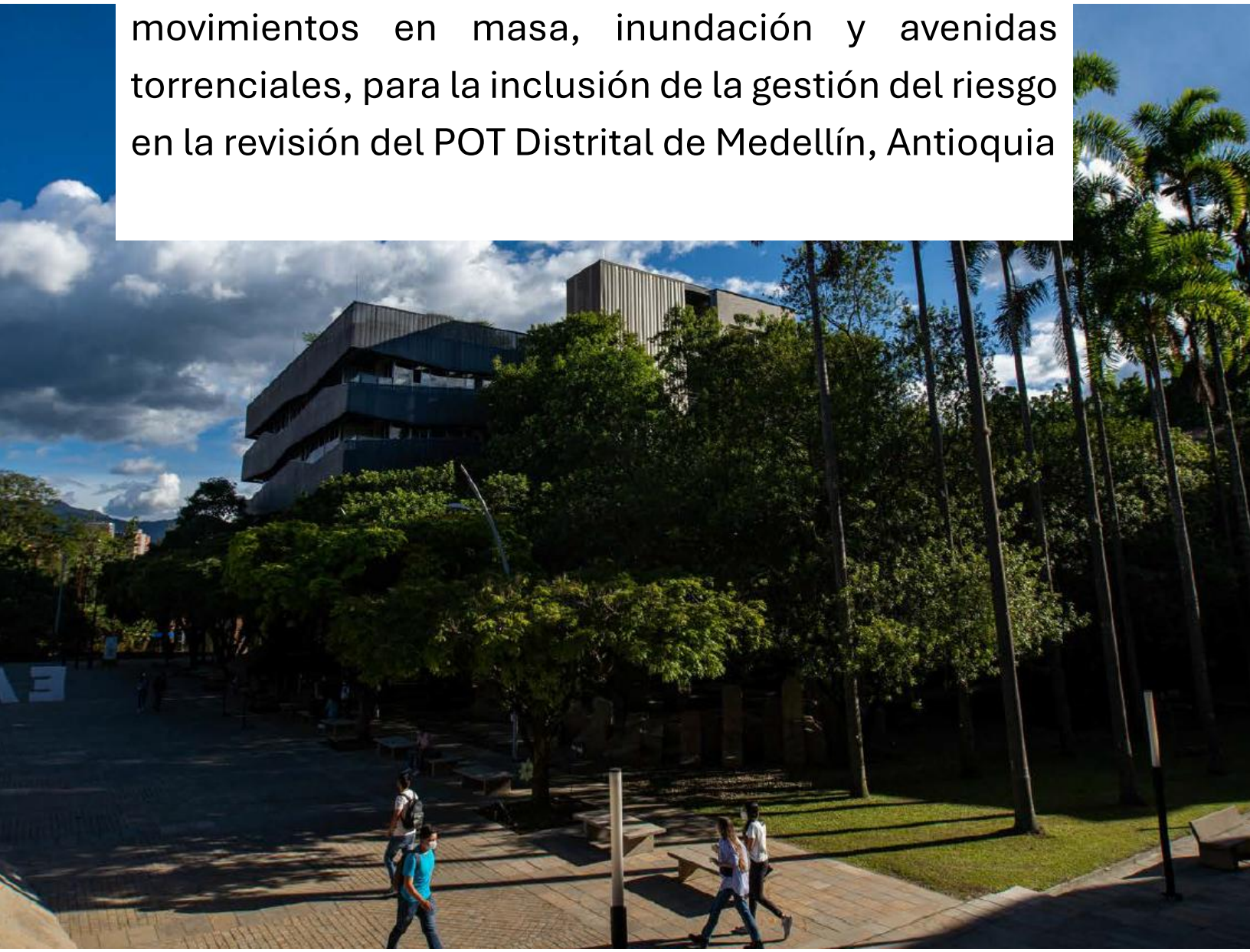
2026

Alcaldía de Medellín
Distrito de
Ciencia, Tecnología e Innovación

edu
Empresa de Desarrollo Urbano

UNIVERSIDAD EAFIT

Elaboración de estudios básicos de amenaza por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales, para la inclusión de la gestión del riesgo en la revisión del POT Distrital de Medellín, Antioquia



ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZA PARA EL DISTRITO DE MEDELLÍN

Alcaldía de Medellín
Distrito de
Ciencia, Tecnología e Innovación

edu
Empresa de Desarrollo Urbano

UNIVERSIDAD EAFIT

INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO

Nombre:	Estudios Básicos Medellín
Objeto:	CONTRATO INTERADMINISTRATIVO DE MANDATO SIN REPRESENTACIÓN LEGAL PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, INUNDACIÓN Y AVENIDAS TORRENCIALES, PARA LA INCLUSIÓN DE LAGESTIÓN DEL RIESGO EN LA REVISIÓN DEL POT DEL DISTRITO ESPECIAL DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN DE MEDELLÍN
Vigencia:	28 de febrero de 2025 al 24 de octubre de 2025.
Alcance geográfico:	Distrito de Medellín

EQUIPO DE TRABAJO

Departamento Administrativo de Planeación - DAP

Luz Ángela González Gómez
Directora del Departamento Administrativo de Planeación
Administradora de Negocios

Martha Isabel Tamayo Vélez
Subdirectora de Planeación Territorial y Estratégica de Ciudad
Arquitecta

Dora Patricia Ortiz Gómez
Líder de Programa (E)
Arquitecta

Martin Alberto Molina Olano
Profesional especializado DAP
Ingeniero geólogo

Julián David Ceballos López
Profesional especializado – contratista DAP
Ingeniero Civil
Especialista en Sistemas de Información Geográfica
Máster en ingeniería - Recursos Hidráulicos

Jenny Machado Charry
Profesional especializado – contratista DAP
Ingeniera Geóloga
Especialista en Gestión Ambiental
Máster en Medio Ambiente y Desarrollo
Doctora en Ingeniería y Recursos Hidráulicos

Yenny Paola Valencia Giraldo
Profesional especializado – contratista DAP
Geóloga
Máster en Planificación y Gestión de Riesgos

Alejandra Moreno Arboleda

Profesional especializada - contratista DAP
Ingeniera Ambiental
Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Manuel Alejandro Montealegre Martínez
Profesional SIG – contratista DAP
Ingeniero Ambiental
Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Alejandra Diaz Rivera
Profesional especializado – contratista DAP
Geóloga
Especialista en Medioambiente y Geoinformática

Santiago Echeverri Castillo
Profesional Especializado - Contratista DAP
Geólogo

Empresa de Desarrollo Urbano - EDU

Emiro Carlos Valdés López
Gerente General
Abogado

Ana Lucia Montoya Castro
Subgerente Operación Urbana Inmobiliaria
Abogada

David Rodríguez Martínez
Director Inmobiliario
Ingeniero Civil
Especialista en Gestión Inmobiliaria
Máster en Economía Aplicada

Mara Paola Restrepo Villegas
Profesional C
Ingeniera Civil
Especialización en Gestión de la Construcción

David Garcés Mesa
Coordinador

Ingeniero Geólogo
Especialista en Inteligencia Artificial
Máster en Ingeniería

UNIVERSIDAD EAFIT

Claudia Restrepo Montoya
Rectora

Juliana Ortiz Marín-
Jefe de ejecución de proyectos
Jefe dirección de innovación y desarrollo tecnológico

Marco Fidel Gamboa Ramírez
Director general del proyecto.
Ingeniero Geólogo.
Especialista en Sistemas de Información Geográfica.
Magister en Ciencias de la Tierra.

EQUIPO ADMINISTRATIVO

María José González Vallejo
Coordinadora ejecución proyectos CTeI
Administradora de negocios
Gerencia de negocios internacionales

Carolina Arredondo García
Analista de proyectos CTeI
Administradora Financiera.
Especialista en Gestión de Servicios.

Camilo Cadavid Isaza
Asistente Coordinación
Geólogo

COMPONENTE MOVIMIENTOS EN MASA

Daniel Felipe Ruiz Restrepo
Coordinador Geotecnia.
Ingeniero civil

Magister y Doctor en Ingeniería del Terreno

Exneyder Andrés Montoya Araque
Ingeniero Geólogo.
Magíster en Ingeniería - Geotecnia
Candidato a Doctor en Ingeniería

Luis Gabriel Correa Ocampo
Geólogo
Especialista en Derecho Minero y Ambiental

Consuelo Durango López
Geóloga

Valentina Carvajal Mosquera
Ingeniera Civil
Especialista en Mecánica de Suelos y Cimentaciones

Elmer José Escudero Pico
Geólogo
Especialista en Sistemas de Información Geográfica

David Ortiz Bermúdez
Ingeniero Geólogo

COMPONENTE INUNDACIÓN Y AVENIDA TORRENCIAL

Alejandra Carmona Duque
Coordinadora Hidráulica.
Ingeniera Civil
Magister y Doctora en Ingeniería de Recursos Hidráulicos

Sebastián Villa Ochoa
Ingeniero civil
Magister en Ingeniería de Recursos Hidráulicos

Jaime Andrés Carmona Ramírez
Ingeniero civil
Magister en Ingeniería de Recursos Hidráulicos

Andrés Felipe Duque Pérez

Ingeniero civil
Magister en Ingeniería de Recursos Hidráulicos

COMPONENTE CARTOGRÁFICO

Juan David Ángel Giraldo
Ingeniero Civil.
Máster en Sistemas de Información Geográfica – SIG.

Emilio José Hoyos Valencia
Ingeniero Forestal.
Especialista en Sistemas de Información Geográfica.

Pablo Andrés Benítez Arango
Ingeniero Forestal
Magister en gerencia de proyectos

Tabla de contenido

GLOSARIO **37**

PRESENTACIÓN **42**

1 METODOLOGÍA **44**

1.1. AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA 44

1.1.1 Métodos estadísticos 47

1.1.2 Métodos de base física 47

1.1.3 Método de propagación de movimientos en masa 49

1.1.4 Zonificación de la amenaza por movimientos en masa 50

1.2. AMENAZA POR INUNDACIÓN Y AVENIDAS TORRENCIALES 51

1.1.5 Estudio hidrológico 53

1.1.6 Estudio Hidráulico 53

1.1.7 Afluentes con evidencia de eventos por inundación que no fueron objeto de modelación hidráulica priorizada 55

2 REVISIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA **61**

3 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEOMORFOLÓGICAS REGIONALES **63**

3.1 GEOLOGÍA REGIONAL 63

3.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL 66

3.3 GEOMORFOLOGÍA REGIONAL 68

4 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEOMORFOLÓGICAS LOCALES **72**

4.1 GEOLOGÍA LOCAL 73

4.1.1 Esquistos de Cajamarca (TReC) 75

4.1.2 Anfibolitas de Medellín (TRaM) 77

4.1.3 Esquistos Anfibólicos de Baldías (TReaB) 81

4.1.4 Migmatitas de Puente Peláez (TRmPP) 82

4.1.5 Gneis de La Ceja (TRgLC) 84

4.1.6 Gneis de Palmitas (TRgP) 84

4.1.7 Milonita de La Iguaná (Jml) 86

4.1.8 Peridotitas de Romeral (JuR) 87

4.1.9 Gabros de Romeral (JgR) 88

Alcaldía de Medellín
Distrito de
Ciencia, Tecnología e Innovación
edu Empresa de Desarrollo Urbano
UNIVERSIDAD EAFIT

4.1.10 Gneis Milonítico de Sajonia (JKgmS) 89
4.1.11 Dunita de Medellín (JKuM) 90
4.1.12 Metabasitas del Picacho (JKmbP) 93
4.1.13 Complejo Quebradagrande (KvQG, KvsQG) 95
4.1.14 Batolito Antioqueño (KcdA) 96
4.1.15 Stock de Las Estancias (KcdE) 97
4.1.16 Stock de Media Luna (KcdML) 99
4.1.17 Batolito de Ovejas (KtO) 100
4.1.18 Stock de Altavista (KdA) 101
4.1.19 Stock de San Diego (KgSD) 103
4.1.20 Depósitos de vertiente (Qd, QFa, QFIV, QFiii, NQFII, NFI y NFprel) 105
4.1.21 Depósitos Aluviales (Qal, Qat) 109
4.1.22 Depósitos antrópicos - Llenos (Qll) 111
4.2 ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS 112
4.3 GEOMORFOLOGÍA LOCAL 115
4.3.1 Macrounidades geomorfológicas 120
4.3.2 Unidades geomorfológicas 126
5 VARIABLES DEL MODELO 137
5.1 VARIABLES MORFOMÉTRICAS 137
5.1.1 Pendientes 137
5.1.2 Rugosidad 139
5.1.3 Curvatura 140
5.1.4 Relieve relativo 142
5.1.5 Aspecto 144
5.1.6 Dirección de flujo 146
5.2 VARIABLES FÍSICO-ESPACIALES 147
5.2.1 Distancia drenajes 147
5.2.2 Distancia fallas 149
5.2.3 Distancia vías 150
5.2.4 Coberturas vegetales 151

Alcaldía de Medellín
Distrito de
Ciencia, Tecnología e Innovación
edu Empresa de Desarrollo Urbano
UNIVERSIDAD EAFIT

6 MORFODINÁMICA 153

7 MODELACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD Y LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA 177

7.1 BASE DE DATOS GEOTÉCNICA 177

7.1.1 Generalidades 177

7.1.2 Distribución de proyectos 178

7.1.3 Distribución de profundidades de los sondeos 179

7.1.4 Análisis estadístico exploratorio 180

7.1.5 Agrupación por zonas geológico-geotécnicas 182

7.2 DELIMITACIÓN DE UNIDADES DE LADERA (UL) 185

7.2.1 Generalidades 186

7.2.2 Implementación en el Distrito de Medellín 187

7.2.3 Inventario de deslizamientos y su relación con las UL 189

7.3 ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA 190

7.3.1 Modelos estadísticos 191

7.3.2 Modelo de red neuronal 210

7.3.3 Modelo en base física determinista 213

7.4 ANÁLISIS DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA 218

7.4.1 Detonante lluvia 218

7.4.2 Detonante sismo 219

7.4.3 Modelos estadísticos 224

7.4.4 Modelo de base física 228

7.5 ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN DE MOVIMIENTOS EN MASA 236

8 ANÁLISIS HIDROLÓGICO 242

8.1 INFORMACIÓN UTILIZADA 246

8.1.1 Información cartográfica 246

8.1.2 Información hidroclimática 247

8.1.3 Usos del suelo y cobertura vegetal 249

8.1.4 Edafología 250

8.2 PROCESAMIENTO DEL MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT) 251

Alcaldía de Medellín
Distrito de
Ciencia, Tecnología e Innovación
edu Empresa de Desarrollo Urbano
UNIVERSIDAD EAFIT

8.2.1 Construcción del MDT 252
8.2.2 Delimitación de cuencas 254
8.3 CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS 257
8.4 ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS 261
8.4.1 Caracterización de la tormenta de diseño 262
8.4.2 Duración de la tormenta 262
8.4.3 Distribución espacial de la tormenta 266
8.4.4 Magnitud de la tormenta 273
8.4.5 Intensidad y magnitud 289
8.4.6 Pérdidas hidrológicas y precipitación efectiva 292
8.4.7 Distribución temporal de la tormenta 302
8.4.8 Cálculo de caudales máximos 304
9 ESTUDIO HIDRÁULICO 317
9.1 ESCENARIOS HIDROLÓGICOS 317
9.2 INFORMACIÓN UTILIZADA 318
9.2.1 Información Topográfica 318
9.2.2 Información Hidrológica (Caudales de Diseño) 322
9.2.3 Estudios Disponibles 325
9.3 DIAGNÓSTICO - EVALUACIÓN CONDICIONES EXISTENTES – ZONA URBANA Y CORREGIMIENTOS 325
9.3.1 Parámetros De Entrada Modelo 2D 339
9.3.2 Visualización de la geometría 348
9.3.3 Análisis Complementario Río Medellín 352
9.3.4 Resultados 359
9.3.5 Análisis de Resultados en Campos de Profundidad y Velocidad 365
9.4 AMENAZA POR INUNDACIÓN 370
9.5 AMENAZA POR INUNDACIÓN EN AFLUENTES CON EVIDENCIA DE EVENTOS QUE NO FUERON OBJETO DE MODELACIÓN HIDRÁULICA PRIORIZADA 373
9.5.1 Nivel 1 Estudios Básicos de Amenaza y estudios de detalle existentes 374
9.5.2 Nivel 2. Modelaciones hidráulicas del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá 376

9.5.3 Nivel 3. Planes Integrales de Ordenamiento y Manejo de Microcuencas 378
9.5.4 Nivel 4. Método geomorfológico complementado con caudales del Estudio Básico de Amenazas 378
9.5.5 Nivel 5. Zonificación POT 2014 y Tramos de cauce en cobertura hidráulica 380
9.6 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIONES DEL SUELO RURAL 380
9.7 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIONES DEL SUELO SUBURBANO . 383
9.8 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIONES DEL SUELO URBANO 387
9.9 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN DEL SUELO DE EXPANSIÓN . 392
9.10 AMENAZA POR TORRENCIALIDAD 394
9.11 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES DEL SUELO RURAL 397
9.12 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES DEL SUELO SUBURBANO 400
9.13 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES DEL SUELO URBANO 404
9.14 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES DEL SUELO DE EXPANSIÓN 408
10 ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES 411
10.1 ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y RIESGO DEL SUELO RURAL (ACRR) 413
10.2 ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA (ACA) Y ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO (ACR) POR INUNDACIÓN Y AVENIDAS TORRENCIALES DEL SUELO SUBURBANO 420
10.3 ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES DEL SUELO URBANO 434
10.4 ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES DEL SUELO URBANO CORREGIMENTAL . 444
10.5 ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES DEL SUELO DE EXPANSIÓN 451
10.6 ÁREAS EN RIESGO – ESTUDIOS DE DETALLE 455
10.7 PRIORIZACIÓN DE ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES 459
11 ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA 461

11.1 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA DEL SUELO RURAL 469

11.2 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA DEL SUELO SUBURBANO 473

11.3 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA DEL SUELO URBANO 484

11.4 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA DEL SUELO DE EXPANSIÓN 493

12 ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA **498**

12.1 ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO DEL SUELO RURAL (ACRR) 500

12.2 ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA (ACA) Y ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO (ACR) DEL SUELO SUBURBANO 502

12.3 ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO DEL SUELO URBANO 510

12.4 ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO DEL SUELO URBANO CORREGIMENTAL 514

12.5 ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO DEL SUELO DE EXPANSIÓN 518

12.6 ÁREAS EN RIESGO – ESTUDIOS DE DETALLE 521

12.7 PRIORIZACIÓN DE ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA 523

13 MEDIDAS DE INTERVENCIÓN **525**

14 LIMITACIONES DEL ESTUDIO **528**

15 BIBLIOGRAFÍA **531**

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Clasificación de los métodos para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa 45

Ilustración 2. Generalidades de los métodos estadísticos y de base física 46

Ilustración 3. Esquema de las componentes del modelo TRIGRS 47

Ilustración 4. Metodología para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa a partir de la probabilidad espacial de falla 48

Ilustración 5. Relación de fichas de revisión de información técnica secundaria 62

Ilustración 6. Mapa geológico regional 64

Ilustración 7 Fallas y lineamientos en el distrito de Medellín 67

Ilustración 8. Mapa geomorfológico regional 69

Ilustración 9. Mapa de unidades geológicas locales del Distrito de Medellín 75

Ilustración 10. Roca fracturada reportada sobre el cauce y margen izquierda de la quebrada La Iguaná 81

Ilustración 11. Saprolito o nivel IC de la Migmatita de Puente Peláez 83

Ilustración 12. Afloramiento roca alterada de Milonita de la Iguaná, margen derecha de la quebrada La Corcovada Fuente: Estudio de detalle Cucaracho, (Universidad EAFIT, 2021) 87

Ilustración 13. Afloramiento roca alterada en corte realizado en la finca las Nubes, sobre la vertiente sur de la quebrada La Loca 93

Ilustración 14. Nivel IIA y roca fracturada reportada sobre la margen derecha de la quebrada Malpaso 95

Ilustración 15. Roca muy fracturada y diaclasada del Stock de Las Estancias 99

Ilustración 16. Roca parcialmente meteorizada IIB, cauce de la quebrada La Iguaná 103

Ilustración 17. Afloramiento localizado en talud de vivienda por escalera principal que baja desde la calle 32 al barrio Candamo 105

Ilustración 18. Depósito de deslizamiento sobre la vía a Aguas Frías, se observa un sector del escarpe del deslizamiento 106

Ilustración 19. Depósitos de vertiente - Flujo de lodos y/o escombros en la urbanización Avellanas 107

Ilustración 20. Afloramiento del depósito de flujo de lodos y escombros 108

Ilustración 21. Depósitos de flujo de lodos y escombros, sector de la quebrada La Batea (a), flujo de lodos y escombros sobre vertiente izquierda de la quebrada Malpaso (b) 109

Ilustración 22. Depósitos de cauce aluvial de la quebrada La Picacha *110*

Ilustración 23. Depósitos aluviotorrenciales sobre la quebrada La Iguaná. *111*

Ilustración 24. Llenos antrópicos *112*

Ilustración 25 Estructuras geológicas en el distrito de Medellín *114*

Ilustración 26. Mapa de unidades geomorfológicas del Distrito de Medellín *127*

Ilustración 27. Cerro Nutibara imagen A tomado de Google Earth 2026, e Imagen B tomada del Plan de Manejo del Área de Recreación Parque Ecológico Cerro Nutibara *128*

Ilustración 28. Escarpe lineal superior localizado en el Corregimiento de Santa Elena, sector sureste del Distrito. *129*

Ilustración 29. Geoforma antrópica relacionado con el relleno sanitario abandonado conocido como cerro de Moravia. *130*

Ilustración 30. Lomos de la parte alta de la comuna 3 Manrique. *130*

Ilustración 31. Lomos bajos localizados en la vereda el Cerro del Corregimiento de Santa Elena. *131*

Ilustración 32. Peldaño localizado en el sector de Media Luna en el corregimiento de Santa Elena *131*

Ilustración 33. Picacho conocido como Pan de Azúcar localizado en el corregimiento de Santa Elena en la vereda Piedras Blancas – Matasano *132*

Ilustración 34. Superficies moderadas en depósitos moderadamente incisados localizados en la vereda Boquerón del corregimiento de San Cristóbal *133*

Ilustración 35. Superficies Suaves en Depósitos Moderadamente Incisados localizados en el barrio de Santo Domingo Savio No 2 de la Comuna 1 Popular al nororiente del Distrito. *134*

Ilustración 36. Superficies Suaves en Depósitos Poco Incisados, localizados en la Comuna 4 Aranjuez y en la parte baja de la Comuna 3 Manrique. *134*

Ilustración 37. Vertientes en suelos residuales moderadamente incisados localizadas al noroccidente del Distrito en las comunas 7 Robledo, 6 Doce de Octubre y 7 Castilla, ... *135*

Ilustración 38. Llanura aluvial del río localizado a la altura de la Universidad de Antioquia, Parque Norte, Jardin Botánico y el barrio Sevilla de la Comuna 4 Aranjuez *136*

Ilustración 39. Mapa de pendientes para el Distrito de Medellín *138*

Ilustración 40. Mapa de rugosidad para el Distrito de Medellín *140*

Ilustración 41. Mapa de curvatura para el Distrito de Medellín *142*

Ilustración 42. Mapa de relieve relativo para el Distrito de Medellín *144*

Ilustración 43. Mapa del aspecto del Distrito de Medellín *145*

Ilustración 44. Mapa de dirección de flujo para el Distrito de Medellín *147*
Ilustración 45. Mapa de variable distancia drenajes para el Distrito de Medellín. *148*
Ilustración 46 Mapa de variable distancia a fallas para el Distrito de Medellín. *150*
Ilustración 47. Mapa de variable distancia a vías para el Distrito de Medellín. *151*
Ilustración 48. Mapa de Coberturas *152*
Ilustración 49. Inventarios de procesos morfodinámicos *155*
Ilustración 50. Mapa reportes de eventos según la fuente *155*
Ilustración 51. Reportes de eventos según SIATA - DAGRD *156*
Ilustración 52. Mapa reportes de eventos según SIATA - DAGRD *157*
Ilustración 53. Eventos estudios geológico geotécnico *158*
Ilustración 54. Mapa de eventos de estudios geológico geotécnico *159*
Ilustración 55. Eventos estudios de detalle *160*
Ilustración 56. Mapa de eventos - estudios de detalle *160*
Ilustración 57. Eventos fotointerpretación *162*
Ilustración 58. Grado de actividad de eventos fotointerpretación. *162*
Ilustración 59. Mapa de eventos – fotointerpretación *163*
Ilustración 60. Zonas recientes afectadas por tipo de evento y lugar de ocurrencia. *164*
Ilustración 61. Área(m2) afectada por zona de análisis. *165*
Ilustración 62. Porcentaje de área según el tipo de proceso por zona de análisis. *166*
Ilustración 63. Mapa de eventos – fotointerpretación a partir de información reciente. *167*
Ilustración 64. Visitas a puntos críticos, sector de Altavista. *168*
Ilustración 65 Deslizamiento en la vereda La Verde *169*
Ilustración 66 Evidencias del deslizamiento observadas durante las inspecciones de campo . *169*
Ilustración 67 Flujo en la vereda La Verde *170*
Ilustración 68 Evidencias del flujo observadas durante las inspecciones de campo *170*
Ilustración 69 Deslizamiento en vereda Piedras Blancas - Matasano *171*
Ilustración 70 Evidencias del deslizamiento traslacional observadas durante las inspecciones de campo *171*
Ilustración 71 Condiciones geológicas del área del deslizamiento *172*
Ilustración 72 Elementos expuestos en el área de la corona del deslizamiento *172*

Ilustración 73 Evidencias del deslizamiento ocurrido en el sector Loma Los Balsos *173*

Ilustración 74 Condiciones geológicas y manejo de aguas del deslizamiento en el sector Loma Los Balsos *174*

Ilustración 75 Edificaciones localizadas en el área de influencia del movimiento en masa *174*

Ilustración 76 Deslizamiento en sector de la vereda El Jardín *175*

Ilustración 77 Evidencias de las afectaciones del deslizamiento en la vereda El Jardín *176*

Ilustración 78. Ubicación geográfica de los sondeos registrados *178*

Ilustración 79. Distribución de sondeos por proyecto *179*

Ilustración 80. Distribución de profundidades de los sondeos de exploración geotécnica para el Distrito de Medellín y los municipios del Área Metropolitana *180*

Ilustración 81. Distribución de los parámetros geomecánicos por unidad geológica y tipo de proyecto *181*

Ilustración 82. Distribución de los parámetros geomecánicos por zona geológica *185*

Ilustración 83. Mapa unidades de ladera en el Distrito de Medellín *188*

Ilustración 84. Detalle de las unidades de ladera en los corregimientos del Distrito de Medellín *189*

Ilustración 85. Densidad de deslizamientos por área en cada UL en el Distrito de Medellín *190*

Ilustración 86. Esquema de la discretización espacial y el marco de modelación desarrollados para el Distrito de Medellín *191*

Ilustración 87. Variables utilizadas en el modelo *195*

Ilustración 88. Ejemplo de matriz de correlación de Sperman evaluadas *197*

Ilustración 89. Asociación de pendientes a cada unidad de ladera en el Distrito de Medellín ... *200*

Ilustración 90. Índice de susceptibilidad por movimientos en masa en el Distrito de Medellín . *201*

Ilustración 91. Curva ROC del modelo de peso de la evidencia *201*

Ilustración 92. Índice de susceptibilidad por movimientos en masa en el Distrito de Medellín . *202*

Ilustración 93. Curva ROC del modelo de regresión logística *203*

Ilustración 94. Índice de susceptibilidad por movimientos en masa en el Distrito de Medellín . *204*

Ilustración 95. Curva ROC del modelo de random forest *204*

Ilustración 96. Índice de susceptibilidad por movimientos en masa a partir de UL en el Distrito de Medellín *206*

Ilustración 97. Índice de susceptibilidad por movimientos en masa a partir de píxeles en el Distrito de Medellín *206*

Ilustración 98. Indicador de la capacidad discriminante de los pesos asignados a las clases de variables independientes con UL 207

Ilustración 99. Indicador de la capacidad discriminante de los pesos asignados a las clases de variables independientes con píxeles 207

Ilustración 100. Curva de éxito, área bajo la curva y delimitación de umbrales para la zonificación por UL 208

Ilustración 101. Curva de éxito, área bajo la curva y delimitación de umbrales para la zonificación por píxeles 208

Ilustración 102. Zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa por UL en el Distrito de Medellín 209

Ilustración 103. Zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa por píxeles en el Distrito de Medellín 209

Ilustración 104. Índice de susceptibilidad por movimientos en masa a partir de UL en el Distrito de Medellín 210

Ilustración 105. Curva ROC del modelo de red neuronal para UL 211

Ilustración 106. Curva de éxito, área bajo la curva y delimitación de umbrales para la zonificación por modelación mediante red neuronal 212

Ilustración 107. Zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa a partir de UL en el Distrito de Medellín 212

Ilustración 108. Distribución espacial de $Zmax$ para un modelo exponencial empírico en el Distrito de Medellín 214

Ilustración 109. Distribución espacial de Zw implementado en el Distrito de Medellín 215

Ilustración 110. Índice de susceptibilidad por movimientos en masa en el Distrito de Medellín 216

Ilustración 111. Curva de éxito, área bajo la curva y delimitación de umbrales para la zonificación por modelación física 217

Ilustración 112. Zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa en el Distrito de Medellín 217

Ilustración 113. Distribución espacial de la lluvia diaria máxima estimada para un Tr de 25 años en el Distrito de Medellín 219

Ilustración 114. Mecanismo de talud infinito representativo de cada unidad de ladera para el análisis sísmico 221

Ilustración 115. Probabilidad de falla sísmica a una escala temporal equivalente de $Tr = 25$ años 222

Ilustración 116. Diferencias en las probabilidades de falla anualizadas para los dos detonantes 223

Ilustración 117. Esquema de estimación del modelo de amenaza por movimientos en masa para el Distrito de Medellín 224

Ilustración 118. Zonificación de la amenaza en el distrito de Medellín por el método peso de la evidencia para un Tr de 25 años 225

Ilustración 119. Zonificación de la amenaza en el distrito de Medellín por el método regresión logística para un Tr de 25 años 226

Ilustración 120. Zonificación de la amenaza en el distrito de Medellín por el método estadístico random forest para un Tr de 25 años 226

Ilustración 121. Zonificación de la amenaza en el Distrito de Medellín por el método estadístico valor de la información (UL) para un Tr de 25 años 227

Ilustración 122. Zonificación de la amenaza en el Distrito de Medellín por el método estadístico valor de la información (píxeles) para un Tr de 25 años 227

Ilustración 123. Zonificación de la amenaza en el Distrito de Medellín por el modelo de red neuronal (UL) para un Tr de 25 años 228

Ilustración 124. Histograma de las muestras aleatorias de los parámetros geomecánicos para cada zona geológica 229

Ilustración 125. Histograma de las muestras aleatorias de los parámetros hidráulicos para el Distrito de Medellín 230

Ilustración 126. Distribución espacial de la probabilidad de falla en ausencia del detonante lluvia en el Distrito de Medellín 231

Ilustración 127. Curva de éxito, área bajo la curva y delimitación de umbrales para la zonificación 232

Ilustración 128. Zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa en el Distrito de Medellín 232

Ilustración 129. Distribución espacial de la probabilidad de falla para el detonante lluvia con Tr de 25 años en el Distrito de Medellín 234

Ilustración 130. Zonificación de la amenaza por movimientos en masa en el Distrito de Medellín 235

Ilustración 131. Histogramas de las muestras aleatorias para la modelación probabilista de propagación de deslizamientos 236

Ilustración 132. índice de Probabilidad de Exposición a Propagación 237

Ilustración 133. Áreas afectadas y zonificación de amenaza por índice de Probabilidad de Exposición a Propagación mayor a 0%. 238

Ilustración 134. Áreas afectadas y zonificación de amenaza por índice de Probabilidad de Exposición a Propagación mayor a 10%. *239*

Ilustración 135. Áreas afectadas y zonificación de amenaza por índice de Probabilidad de Exposición a Propagación mayor a 25%. *239*

Ilustración 136. Áreas afectadas y zonificación de amenaza por índice de Probabilidad de Exposición a Propagación mayor a 50%. *240*

Ilustración 137. Zonificación de la amenaza por movimientos en masa con propagación en el Distrito de Medellín *241*

Ilustración 138. Mapa de delimitación de las cuencas hidrográficas priorizadas *245*

Ilustración 139. Mapa de información cartográfica empleada para el análisis hidrológico *247*

Ilustración 140. Estaciones pluviométricas en la zona de estudio y polígonos de Thiessen *249*

Ilustración 141. Mapa de Coberturas *250*

Ilustración 142. Mapa de unidades de suelo en el área de interés *251*

Ilustración 143. Mapa del MDT hidrológicamente corregido *254*

Ilustración 144. Mapa de delimitación de las cuencas hidrográficas priorizadas *256*

Ilustración 145. Esquematización del proceso de estimación de caudales máximos *261*

Ilustración 146. Comparación de diferentes estimaciones para las curvas IDF - T_R 100 años ... *274*

Ilustración 147. Comparación de diferentes estimaciones para las curvas IDF - T_R 100 años ... *274*

Ilustración 148. Comparación de diferentes estimaciones para las curvas IDF - T_R 100 años ... *274*

Ilustración 149. Comparación de diferentes estimaciones para las curvas IDF - T_R 100 años ... *275*

Ilustración 150. Curvas IDF para las estaciones San Cristóbal y Fabricato *275*

Ilustración 151. Curvas IDF para las estaciones Chorrillos y Mazo *276*

Ilustración 152. Curvas IDF para las estaciones Villa Hermosa y Gerona *276*

Ilustración 153. Curvas IDF para las estaciones Astillero y Vasconia *276*

Ilustración 154. Curvas IDF para las estaciones San Antonio de Prado y Medellín *277*

Ilustración 155. Curvas IDF para la estación Ayurá *277*

Ilustración 156. Ajuste logarítmico y potencial para un evento de duración de 480 minutos en la estación 2701037 (Fabricato) en el Escenario IDF 3 ..... *288*

Ilustración 157. Ajuste logarítmico y potencial para un evento de duración de 30 minutos en la estación 2701046 (San Cristóbal) – En el Escenario IDF 1 ..... *288*

Ilustración 158. Curvas IDF para las estaciones Llanos de San Juan y El Chuscal *289*

Ilustración 159. Mapa de número de curva *296*

Ilustración 160. Aguacero de diseño en la quebrada La Presidenta *302*

Ilustración 161. Aguacero de diseño en la quebrada Ana Díaz *303*

Ilustración 162. Hidrógrafa de respuesta de la quebrada Doña María para Tr 2 años (izquierda) y 10 años (derecha). *304*

Ilustración 163. Hidrógrafa de respuesta de la quebrada Doña María para Tr 50 años (izquierda) y 100 años (derecha)..... *304*

Ilustración 164. Hidrógrafa de respuesta de la quebrada Doña María para Tr 200 años (izquierda) y 500 años (derecha). *305*

Ilustración 165. Hidrógrafa de respuesta de la quebrada La Aguacatala para Tr 2 años (izquierda) y 10 años (derecha). *305*

Ilustración 166. Hidrógrafa de respuesta de la quebrada La Aguacatala para Tr 50 años (izquierda) y 100 años (derecha). *306*

Ilustración 167. Hidrógrafa de respuesta de la quebrada La Aguacatala para Tr 200 años (izquierda) y 500 años (derecha)..... *306*

Ilustración 168. Superficie del terreno utilizada en modelación hidráulica (LIDAR 1 m x 1 m) ... *319*

Ilustración 169. Secciones transversales en modelación hidráulica *320*

Ilustración 170 Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 1..... *328*

Ilustración 171. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 2..... *329*

Ilustración 172. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 3..... *329*

Ilustración 173. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 4..... *330*

Ilustración 174. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 5..... *330*

Ilustración 175. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 6..... *331*

Ilustración 176. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 7..... *331*

Ilustración 177. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 8..... *332*

Ilustración 178. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 9..... *332*

Ilustración 179. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 10..... *333*

Ilustración 180. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 11..... *333*

Ilustración 181. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 12..... *334*

Ilustración 182. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 13..... *334*

Ilustración 183. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 14..... *335*

Ilustración 184. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico Q. La Iguaná..... *335*

Ilustración 185. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico Q. Potreritos *336*

Ilustración 186. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico La Potrera 337

Ilustración 187. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico La Puerta 337

Ilustración 188. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico La Borbollona 337

Ilustración 189. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico El Hato 337

Ilustración 190. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico La Gómez 337

Ilustración 191. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico La Malpaso 337

Ilustración 192. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico La Madera..... 338

Ilustración 193. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico La Potrera 338

Ilustración 194. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico La Cantera..... 338

Ilustración 195. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico La Quintana 338

Ilustración 196. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico Aguas Frías 339

Ilustración 197. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico La García 339

Ilustración 198. Regiones con n de Manning para el escenario evaluado 342

Ilustración 199. Modelo Hidráulico Bidimensional implementado para la Quebrada La Iguaná 349

Ilustración 200. Modelo Hidráulico Bidimensional implementado para la Quebrada Malpaso . 349

Ilustración 201. Modelo Hidráulico Bidimensional implementado para la Quebrada La Quintana 350

Ilustración 202. Modelo Hidráulico Bidimensional implementado para la Quebrada La Cantera (Ramal Sur) 350

Ilustración 203. Modelo Hidráulico Bidimensional implementado para la Quebrada La Madera 351

Ilustración 204. Modelo Hidráulico Bidimensional implementado para Q. Doña María y La Presidenta 351

Ilustración 205. Modelo Hidráulico Bidimensional implementado para Q. Santa Elena y La Hueso 352

Ilustración 206. Superficie o terreno elaborado para el tramo de estudio, tramo complementario río Medellín. 356

Ilustración 207. Esquema del tramo analizado y las secciones transversales de referencia para el tramo complementario del río Medellín. 357

Ilustración 208. Regiones con n de Manning para el escenario evaluado, complemento río Medellín. 358

Ilustración 209. Campo de profundidad y velocidad para TR100 en quebrada La Presidenta ... 362

Ilustración 210. Campo de profundidad y velocidad para TR500+40 en quebrada La Presidenta *362*

Ilustración 211. Campo de profundidad y velocidad para TR100 en quebrada Doña María..... *363*

Ilustración 212. Campo de profundidad y velocidad para TR500+40 en quebrada Doña María . *363*

Ilustración 213. Campo de profundidad y velocidad para TR100 en quebrada La Iguaná *364*

Ilustración 214. Campo de profundidad y velocidad para TR500+40 en quebrada La Iguaná.... *364*

Ilustración 215. Campo de profundidad y velocidad para TR100 en quebrada Santa Elena *365*

Ilustración 216. Campo de profundidad y velocidad para TR500+40 en quebrada Santa Elena *366*

Ilustración 217. Zonificación de la amenaza por inundación en el Distrito de Medellín *372*

Ilustración 218. Zonificación de la amenaza por inundación del suelo rural del Distrito de Medellín *381*

Ilustración 219. Distribución de la amenaza por inundación en el suelo rural del Distrito de Medellín..... *383*

Ilustración 220. Amenaza por inundación del suelo suburbano del Distrito de Medellín *384*

Ilustración 221. Distribución de la amenaza por inundación del suelo suburbano del Distrito de Medellín..... *385*

Ilustración 222. Amenaza por inundación en centros poblados del Distrito de Medellín *386*

Ilustración 223. Distribución de la amenaza por inundación en los centros poblados del Distrito de Medellín *387*

Ilustración 224. Amenaza por inundación del suelo urbano del Distrito de Medellín..... *388*

Ilustración 225. Amenaza por inundación del suelo urbano corregimental del Distrito de Medellín *389*

Ilustración 226. Amenaza por inundaciones del suelo urbano del Distrito de Medellín *392*

Ilustración 227. Amenaza por inundaciones del suelo de expansión del Distrito de Medellín... *393*

Ilustración 228. Amenaza por inundaciones del suelo de expansión del Distrito de Medellín... *394*

Ilustración 229. Amenaza por avenida torrencial en el Distrito de Medellín *396*

Ilustración 230. Amenaza por avenidas torrenciales del suelo rural del Distrito de Medellín.... *398*

Ilustración 231. Distribución de la amenaza por avenidas torrenciales en el suelo rural del Distrito de Medellín *400*

Ilustración 232. Zonificación de la amenaza por avenida torrencial en el suelo suburbano del Distrito de Medellín *401*

Ilustración 233. Distribución de la amenaza por avenidas torrenciales en el suelo rural del Distrito de Medellín *402*

Ilustración 234. Amenaza por avenida torrencial en centros poblados del Distrito de Medellín *403*

Ilustración 235. Distribución de la amenaza por avenida torrencial en los centros poblados del Distrito de Medellín *404*

Ilustración 236. Amenaza por avenidas torrenciales del suelo urbano del Distrito de Medellín *405*

Ilustración 237. Amenaza por avenidas torrenciales en el suelo urbano del Distrito de Medellín *408*

Ilustración 238. Amenaza por avenidas torrenciales del suelo de expansión del Distrito de Medellín..... *409*

Ilustración 239. Amenaza por avenidas torrenciales en el suelo de expansión del Distrito de Medellín..... *410*

Ilustración 240. Áreas con condición de amenaza por inundaciones del suelo rural del Distrito de Medellín..... *414*

Ilustración 241. Áreas con condición de riesgo por inundaciones del suelo rural del Distrito de Medellín..... *414*

Ilustración 242. Áreas con condición de amenaza por avenidas del suelo rural del Distrito de Medellín..... *415*

Ilustración 243. Áreas con condición de riesgo por avenidas del suelo rural del Distrito de Medellín *415*

Ilustración 244. Áreas con condición de amenaza por inundaciones del suelo rural del Distrito de Medellín..... *418*

Ilustración 245. Áreas con condición de riesgo por inundación en el suelo de rural del Distrito de Medellín..... *418*

Ilustración 246. Áreas con condición de amenaza por avenida torrencial del suelo rural del Distrito de Medellín *419*

Ilustración 247. Áreas con condición de riesgo por avenidas torrenciales en el suelo de rural del Distrito de Medellín *419*

Ilustración 248. Áreas con condición de amenaza por inundación del suelo suburbano del Distrito de Medellín *421*

Ilustración 249. Áreas con condición de riesgo por inundaciones del suelo suburbano del Distrito de Medellín *422*

Ilustración 250. Áreas con condición de amenaza por avenidas torrenciales del suelo suburbano del Distrito de Medellín..... *423*

Ilustración 251. Áreas con condición de riesgo por avenidas torrenciales del suelo suburbano del Distrito de Medellín 424

Ilustración 252. Áreas con condición de amenaza por inundaciones del suelo suburbano del Distrito de Medellín 425

Ilustración 253. Áreas con condición de riesgo por inundaciones del suelo suburbano del Distrito de Medellín 426

Ilustración 254. Áreas con condición de amenaza por avenidas torrenciales del suelo suburbano del Distrito de Medellín 426

Ilustración 255. Áreas con condición de riesgo por avenidas torrenciales del suelo suburbano del Distrito de Medellín 427

Ilustración 256. Áreas con condición de amenaza por inundación en centros poblados del Distrito de Medellín 428

Ilustración 257. Áreas con condición de riesgo por inundaciones en los centros poblados del Distrito de Medellín 429

Ilustración 258. Áreas con condición de amenaza por avenidas torrenciales en centros poblados del Distrito de Medellín 430

Ilustración 259. Áreas con condición de riesgo por avenidas torrenciales en centros poblados del Distrito de Medellín 431

Ilustración 260. Áreas con condición de amenaza por inundaciones en los centros poblados del Distrito de Medellín 432

Ilustración 261. Áreas con condición de riesgo por inundaciones en los centros poblados del Distrito de Medellín 433

Ilustración 262. Áreas con condición de amenaza por avenidas torrenciales en los centros poblados del Distrito de Medellín 433

Ilustración 263. Áreas con condición de riesgo por avenidas torrenciales en los centros poblados del Distrito de Medellín 434

Ilustración 264. Áreas con condición de amenaza por inundaciones del suelo urbano del Distrito de Medellín 435

Ilustración 265. Áreas con condición de riesgo por inundaciones del suelo urbano del Distrito de Medellín 436

Ilustración 266. Áreas con condición de amenaza por avenidas torrenciales del suelo urbano del Distrito de Medellín 437

Ilustración 267. Áreas con condición de riesgo por avenidas torrenciales del suelo urbano del Distrito de Medellín 438

Ilustración 268. Áreas con condición de amenaza por inundaciones del suelo urbano del Distrito de Medellín *441*

Ilustración 269. Áreas con condición de riesgo por inundaciones del suelo urbano del Distrito de Medellín *442*

Ilustración 270. Áreas con condición de amenaza por avenidas torrenciales del suelo urbano del Distrito de Medellín *443*

Ilustración 271. Áreas con condición de riesgo por avenidas torrenciales del suelo urbano del Distrito de Medellín *444*

Ilustración 272. Áreas con condición de amenaza por inundaciones del suelo urbano de los corregimientos Altavista, San Cristóbal y San Antonio de Prado *445*

Ilustración 273. Áreas con condición de riesgo por inundaciones del suelo urbano de los corregimientos Altavista, San Cristóbal y San Antonio de Prado *446*

Ilustración 274. Áreas con condición de amenaza por avenidas torrenciales del suelo urbano de los corregimientos Altavista, San Cristóbal y San Antonio de Prado *447*

Ilustración 275. Áreas con condición de riesgo por avenidas torrenciales del suelo urbano de los corregimientos Altavista, San Cristóbal y San Antonio de Prado *448*

Ilustración 276. Áreas con condición de amenaza (ACA) por inundaciones de las cabeceras corregimentales del Distrito de Medellín *449*

Ilustración 277. Áreas con condición de riesgo (ACR) por inundaciones de las cabeceras corregimentales del Distrito de Medellín *450*

Ilustración 278. Áreas con condición de amenaza (ACA) por avenidas torrenciales de las cabeceras corregimentales del Distrito de Medellín *450*

Ilustración 279. Áreas con condición de riesgo (ACR) por avenidas torrenciales de las cabeceras corregimentales del Distrito de Medellín *451*

Ilustración 280. Áreas con condición de amenaza por inundaciones de los suelos de expansión del Distrito de Medellín *452*

Ilustración 281. Áreas con condición de amenaza por avenidas torrenciales de los suelos de expansión del Distrito de Medellín *453*

Ilustración 282. Áreas con condición de amenaza (ACA)) por inundaciones en los suelos de expansión del Distrito de Medellín *454*

Ilustración 283. Áreas con condición de amenaza (ACA) por avenidas torrenciales en los suelos de expansión del Distrito de Medellín *454*

Ilustración 284. Áreas en la categoría de riesgo por inundación en estudios de detalle en el suelo urbano *457*

Ilustración 285. Áreas en la categoría de riesgo por inundación en estudios de detalle en el suelo rural 457

Ilustración 286. Áreas en la categoría de riesgo por avenidas torrenciales en estudios de detalle en el suelo urbano 458

Ilustración 287. Áreas en la categoría de riesgo por avenidas torrenciales en estudios de detalle en el suelo rural 459

Ilustración 288. Metodología para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa a partir de la probabilidad espacial de falla 463

Ilustración 289. Esquema de la zonificación de la amenaza total por movimientos en masa en el Distrito de Medellín 465

Ilustración 290. Distribución de la amenaza por movimientos en masa del Distrito de Medellín 468

Ilustración 291. Amenaza por movimientos en masa del Distrito de Medellín 469

Ilustración 292. Amenaza por movimientos en masa del suelo rural del Distrito de Medellín ... 470

Ilustración 293. Distribución de la amenaza por movimientos en masa en los corregimientos del Distrito de Medellín 471

Ilustración 294. Amenaza por movimientos en masa del suelo suburbano del Distrito de Medellín 474

Ilustración 295. Distribución de la amenaza por movimientos en masa del suelo suburbano del Distrito de Medellín 475

Ilustración 296. Amenaza por movimiento en masa en centros poblados del Distrito de Medellín 482

Ilustración 297. Distribución de amenaza por movimientos en masa por cada uno de los centros poblados del Distrito 483

Ilustración 298. Amenaza por movimientos en masa del suelo urbano del Distrito de Medellín 484

Ilustración 299. Distribución de la amenaza por movimientos en masa del suelo urbano del Distrito de Medellín 485

Ilustración 300. Amenaza por movimientos en masa en el suelo de expansión del Distrito de Medellín 494

Ilustración 301. Distribución de la amenaza por movimientos en masa del suelo de expansión del Distrito de Medellín 495

Ilustración 302. Áreas con condición de riesgo del suelo rural del Distrito de Medellín 500

Ilustración 303. Distribución de las áreas con condición de riesgo del suelo rural del Distrito de Medellín 501

Ilustración 304. Áreas con condición de amenaza del suelo suburbano del Distrito de Medellín *503*

Ilustración 305. Áreas con condición de riesgo del suelo suburbano del Distrito de Medellín .. *504*

Ilustración 306. Áreas con condición de amenaza por polígono del suelo suburbano del Distrito de Medellín..... *505*

Ilustración 307. Áreas con condición de riesgo por polígono del suelo suburbano del Distrito de Medellín..... *505*

Ilustración 308. Áreas con condición de amenaza por movimiento en masa en centros poblados del Distrito de Medellín..... *507*

Ilustración 309. Áreas con condición de riesgo por movimiento en masa en los centros poblados del Distrito de Medellín..... *508*

Ilustración 310. Áreas con condición de amenaza por movimiento en masa en los centros poblados del Distrito de Medellín..... *509*

Ilustración 311. Áreas con condición de riesgo por movimiento en masa en los centros poblados del Distrito de Medellín..... *510*

Ilustración 312. Áreas con condición de amenaza del suelo urbano del Distrito de Medellín ... *511*

Ilustración 313. Áreas con condición de riesgo del suelo urbano del Distrito de Medellín *512*

Ilustración 314. Áreas con condición de amenaza por polígono del suelo urbano del Distrito de Medellín..... *513*

Ilustración 315. Áreas con condición de riesgo por polígono del suelo urbano del Distrito de Medellín..... *513*

Ilustración 316. Áreas con condición de amenaza del suelo urbano de los corregimientos Altavista, San Cristóbal y San Antonio de Prado..... *515*

Ilustración 317. Áreas con condición de riesgo del suelo urbano de los corregimientos Altavista, San Cristóbal y San Antonio de Prado..... *516*

Ilustración 318. Áreas con condición de amenaza del suelo urbano de los corregimientos Altavista, San Cristóbal y San Antonio de Prado..... *517*

Ilustración 319. Áreas con condición de riesgo del suelo urbano de los corregimientos Altavista, San Cristóbal y San Antonio de Prado..... *517*

Ilustración 320. Áreas con condición de amenaza de los suelos de expansión del Distrito de Medellín..... *518*

Ilustración 321. Áreas con condición de riesgo de los suelos de expansión del Distrito de Medellín *519*

Ilustración 322. Áreas con condición de amenaza por polígono de los suelos de expansión del Distrito de Medellín *520*

Ilustración 323. Áreas con condición de riesgo por polígono de los suelos de expansión del Distrito de Medellín *520*

Ilustración 324. Áreas en la categoría de riesgo por estudios de detalle del Distrito de Medellín *522*

Lista de tablas

Tabla 1.Informes revisados por temática *61*

Tabla 2. Unidades de relieve y paisaje *115*

Tabla 3.Clasificación geomorfológica del distrito de Medellín en la jerarquización geomorfológica del Valle de Aburrá *117*

Tabla 4. Unidades geomorfológicas del Distrito de Medellín *118*

Tabla 5. Distribución de las clases de pendientes para el Distrito de Medellín *139*

Tabla 6. Distribución de las clases de rugosidad para el Distrito de Medellín *140*

Tabla 7. Distribución de las clases de curvatura para el Distrito de Medellín *141*

Tabla 8. Distribución de las clases del índice de relieve relativo para el Distrito de Medellín *143*

Tabla 9. Dirección y orientación de las pendientes, en términos del rumbo, de las celdas del ráster *145*

Tabla 10. Dirección de flujo, en términos del rumbo, de las celdas del ráster *146*

Tabla 11. Distribución de la variable distancia drenajes para el Distrito de Medellín. *148*

Tabla 12. Distribución de la variable distancia fallas para el Distrito de Medellín. *149*

Tabla 13. Distribución de la variable distancia vías para el Distrito de Medellín. *151*

Tabla 14. Fuentes de información *153*

Tabla 15. Fuentes de información para la fotointerpretación *154*

Tabla 16. Eventos base de datos DAGRD - SIATA *156*

Tabla 17. Base de datos de estudios geológico geotécnico - DAGRD *157*

Tabla 18. Base de datos estudios de detalle, Distrito de Medellín *159*

Tabla 19. Base de datos eventos fotointerpretación *161*

Tabla 20. Base de datos según grado de actividad fotointerpretación *162*

Tabla 21. Resumen de la información secundaria revisada, almacenada y procesada *177*

Tabla 22. Zonas geológicas establecidas para las unidades geológicas del Distrito de Medellín y los municipios del Área Metropolitana 183

Tabla 23. Modelos ejecutados para el Distrito de Medellín 191

Tabla 24. Compilado de parámetros geotécnicos y sus estadísticos descriptivos 213

Tabla 25. Valores de $kST/amax$ mínimos para análisis seudoestático de taludes..... 220

Tabla 26. Matriz de decisión para la zonificación de la amenaza por movimientos en masa para el Distrito de Medellín 224

Tabla 27. Distribución de áreas en los diferentes índices de propagación 240

Tabla 28. Quebradas priorizadas..... 243

Tabla 29. Información de curvas de nivel utilizada 247

Tabla 30. Estaciones con información de precipitación..... 248

Tabla 31. Ubicación de los puntos de cierre de las cuencas priorizadas. MAGNA Sirgas Origen Nacional 254

Tabla 32. Parámetros morfométricos de las cuencas priorizadas..... 258

Tabla 33. Tiempos de concentración obtenidos para las cuencas priorizadas..... 264

Tabla 34. Áreas de influencia de las estaciones con información IDF para cada cuenca (km^2). 267

Tabla 35. Porcentaje de áreas de influencia de las estaciones con información IDF para cada cuenca (%)..... 270

Tabla 36. Parametrización de curvas IDF para diferentes periodos de retorno..... 278

Tabla 37. Valores de intensidad de lluvia (mm/hora) para diferentes periodos de retorno..... 289

Tabla 38. Valores de ~~profundidad de lluvia~~ precipitación (mm) para diferentes periodos de retorno 291

Tabla 39.Relación entre las coberturas clasificadas según la metodología "Corine Land Cover" y la clasificación de coberturas del NRCS..... 292

Tabla 40.Clasificación hidrológica del suelo..... 294

Tabla 41.Número de curva, pérdidas hidrológicas y precipitación efectiva en las cuencas priorizadas..... 296

Tabla 42. Valores de precipitación efectiva (mm) para diferentes periodos de retorno..... 298

Tabla 43. Coeficiente de escorrentía estimado para las cuencas priorizadas..... 300

Tabla 44. Caudales máximos (m^3/s) estimados para las cuencas priorizadas por el método de Snyder 306

Tabla 45. Caudales máximos (m^3/s) estimados para las cuencas priorizadas por el método de NRCS 308

Tabla 46. Caudales máximos (m^3/s) estimados para las cuencas priorizadas por el método de Williams y Hann 310

Tabla 47. Caudales máximos (m^3/s) estimados para las cuencas priorizadas por el método de Clark 312

Tabla 48. Caudales máximos (m^3/s) estimados para las cuencas priorizadas por el método de Racional 314

Tabla 49. Tamaño malla utilizada en el modelo 2D. 320

Tabla 50. Caudales máximos implementados en modelación hidráulica. 322

Tabla 51 Agrupación de corrientes en los modelos hidráulicos Carpeta Zona 1 326

Tabla 52. Coeficientes de rugosidad n de Manning 340

Tabla 53. Condiciones de borde en los diferentes modelos elaborados. 345

Tabla 54. Paso de tiempo utilizado en los modelos hidráulicos. 347

Tabla 55. Caudales máximos río Medellín en tramo centro y norte (m^3/s). 353

Tabla 56. Caudales determinados para diferentes escenarios en Puente Acevedo. 354

Tabla 57. Caudales máximos del río Medellín (m^3/s) para diferentes periodos de retorno y en tramo de interés como complemento. 355

Tabla 58. Tamaño malla utilizada en el modelo 2D. 356

Tabla 59. Pendientes en tramo aguas arriba y aguas abajo para río Aburrá / Medellín en tramo complementario. 359

Tabla 60. Porcentaje del área de cuenca ocupada por inundación (TR100). 366

Tabla 61. Porcentaje del área de cuenca ocupada por avenida torrencial (TR500 + 40). 368

Tabla 62. Tabla de categorización simplificada de la amenaza como el producto de la velocidad por la profundidad. 371

Tabla 63 Listado de drenajes analizados por los estudios básicos y de detalle 374

Tabla 64 Listado de drenajes analizados mediante modelación hidráulica DAGRD-SIATA 377

Tabla 65 Listado de drenajes con zonificación del PIOM 378

Tabla 66 Listado de drenajes con análisis geomorfológico fluvial 379

Tabla 67 Drenajes que mantuvieron la zonificación del POT 2014 380

Tabla 68. Áreas de amenaza por inundaciones del suelo rural de los corregimientos del Distrito de Medellín 381

Tabla 69. Áreas de amenaza por inundación del suelo suburbano del Distrito de Medellín 384

Tabla 70. Áreas de amenaza por inundación en centros poblados del Distrito de Medellín 386

Tabla 71. Áreas de amenaza por inundación del suelo urbano del Distrito de Medellín 389

Tabla 72. Amenaza por inundación del suelo de expansión del Distrito de Medellín 394

Tabla 73. Tabla de decisión para la definición de la amenaza por avenida torrencial 395

Tabla 74. Áreas de amenaza por avenidas torrenciales de los corregimientos del Distrito de Medellín 398

Tabla 75. Áreas de amenaza por avenidas torrenciales del suelo suburbano del Distrito de Medellín 401

Tabla 76. Amenaza por avenida torrencial en centros poblados del Distrito de Medellín 403

Tabla 77. Amenaza por avenidas torrenciales del suelo urbano del Distrito de Medellín 405

Tabla 78. Amenaza por avenidas torrenciales de expansión del Distrito de Medellín 410

Tabla 79. Ejemplo codificación áreas con condición de amenaza (ACA) del Distrito de Medellín 412

Tabla 80. Ejemplo de codificación áreas con condición de riesgo (ACR) del Distrito de Medellín 413

Tabla 81. Áreas con condición de riesgo rural y Áreas con condición de amenaza del Distrito de Medellín 416

Tabla 82. Áreas con condición de amenaza y áreas con condición de riesgo por inundaciones y avenidas torrenciales del suelo suburbano del Distrito de Medellín 424

Tabla 83. Áreas con condición de amenaza y áreas con condición de riesgo por inundaciones y avenidas torrenciales en centros poblados del Distrito de Medellín 431

Tabla 84. Áreas con condición de riesgo del suelo urbano del Distrito de Medellín 438

Tabla 85. Áreas con condición de amenaza y condición de riesgo del suelo urbano corregimental del Distrito de Medellín 448

Tabla 86. Áreas con condición de amenaza y condición de riesgo por inundaciones y avenidas torrenciales de suelos de expansión del Distrito de Medellín 455

Tabla 87. Áreas con categoría de riesgo de estudios de detalle del Distrito de Medellín 455

Tabla 88. Priorización de polígonos con condición de riesgo por inundación del Distrito de Medellín 460

Tabla 89. Priorización de polígonos con condición de riesgo por avenidas torrenciales del Distrito de Medellín 460

Tabla 90. Estudios incorporados para la zonificación de amenaza por movimientos en masa. 465

Tabla 91. Fuente de la zonificación de amenaza por movimientos en masa del Distrito de Medellín *468*

Tabla 92. Áreas por categoría de amenaza por movimientos en masa del Distrito de Medellín . *468*

Tabla 93. Áreas de amenaza por corregimientos del Distrito de Medellín *469*

Tabla 94. Áreas de amenaza total del suelo rural del Distrito de Medellín..... *470*

Tabla 95. Áreas de amenaza por movimientos en masa del suelo rural del Distrito de Medellín *471*

Tabla 96. Áreas de amenaza por movimientos en masa del suelo suburbano del Distrito de Medellín..... *475*

Tabla 97. Áreas de amenaza por movimiento en masa en centros poblados del Distrito de Medellín *483*

Tabla 98. Áreas de amenaza por movimientos en masa del suelo urbano del Distrito de Medellín *485*

Tabla 99. Áreas de amenaza por movimientos en masa del suelo de expansión del Distrito de Medellín..... *495*

Tabla 100. Áreas con condición de riesgo rural (ACRR) del Distrito de Medellín..... *501*

Tabla 101. Áreas con condición de amenaza y áreas con condición de riesgo suburbano del Distrito de Medellín *506*

Tabla 102. Áreas con condición de amenaza y áreas con condición de riesgo por movimiento en masa en centros poblados del Distrito de Medellín..... *508*

Tabla 103. Áreas con condición de riesgo del suelo urbano del Distrito de Medellín *514*

Tabla 104. Áreas con condición de amenaza y condición de riesgo del suelo urbano corregimental del Distrito de Medellín *516*

Tabla 105. Áreas con condición de riesgo de suelos de expansión del Distrito de Medellín..... *521*

Tabla 106. Áreas con categoría de riesgo de estudios de detalle del Distrito de Medellín *521*

Tabla 107. Priorización de polígonos con condición de riesgo por movimiento en masa del Distrito de Medellín *523*

Tabla 108. Priorización de polígonos con condición de riesgo por movimiento en masa del Distrito de Medellín *524*

Lista de anexos

Anexo 1. Documento Metodológico

Anexo 2. Revisión de información secundaria

Anexo 3. Matriz de priorización

Anexo 4. Morfometría

Anexo 5. Hidrología

Anexo 6. Amenaza por inundación y avenidas torrenciales

Anexo 7. Zonificación de ACA y ACR por inundaciones y avenidas torrenciales

Anexo 8. Priorización ACR por inundación y avenida torrencial

Anexo 9. Amenaza por movimientos en masa

Anexo 10. Zonificación de ACA y ACR por movimientos en masa

Anexo 11. ACR por movimientos en masa priorizadas

Anexo 12. Medidas de Manejo

Anexo 13. Diccionario Datos Geográficos

Anexo 14 Documentación aplicativo de control

Anexo 15. Insumos amenaza MM

GLOSARIO

GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ACRÓNIMOS

Estudios Básicos de Amenaza por Movimientos en Masa, Inundación y Avenidas Torrenciales
Distrito Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación de Medellín

---

GLOSARIO DE TÉRMINOS

ACA – Área con Condición de Amenaza

Área delimitada a partir de estudios básicos o detallados de amenaza donde se identifican niveles de amenaza media o alta por fenómenos naturales o socio-naturales, respecto de la cual deberán establecerse condicionamientos y determinantes para el uso y ocupación del suelo en el Plan de Ordenamiento Territorial, conforme a lo dispuesto en el Decreto 1077 de 2015 (incorporación de la gestión del riesgo en los instrumentos de planificación territorial).

ACR – Área con Condición de Riesgo

Área delimitada en la cual confluyen amenaza y elementos expuestos (población, edificaciones, infraestructura o actividades económicas), configurando una condición de riesgo que requiere medidas de reducción, mitigación o reasentamiento, conforme a la Ley 1523 de 2012 y al Decreto 1077 de 2015.

Amenaza

Peligro latente de que un evento físico de origen natural, socio-natural o antrópico se presente con severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones o daños en bienes, infraestructura o recursos ambientales (Ley 1523 de 2012, art. 4).

Riesgo

Probabilidad de pérdidas o daños en personas, bienes, infraestructura y medios de subsistencia, resultado de la interacción entre amenaza y vulnerabilidad (Ley 1523 de 2012, art. 4).

Susceptibilidad

Propensión intrínseca del terreno a presentar un fenómeno determinado, evaluada a partir de factores condicionantes físicos, geológicos, geomorfológicos e hidrológicos, sin considerar la probabilidad temporal del detonante (SGC, 2017).

Amenaza por movimientos en masa

Probabilidad de ocurrencia de procesos de remoción en masa en un área determinada y dentro de un período de tiempo específico (SGC, 2017).

Movimiento en masa

Proceso gravitacional que implica el desplazamiento descendente de suelo, roca o detritos a lo largo de una pendiente (SGC, 2017).

Amenaza por inundación

Probabilidad de desbordamiento de una corriente superficial que supera la capacidad hidráulica del cauce e invade áreas normalmente no sumergidas (IDEAM; Decreto 1077 de 2015).

Inundación

Fenómeno hidrológico que se produce cuando el nivel del agua en un cauce excede su capacidad de conducción, generando desbordamiento hacia áreas adyacentes (IDEAM).

Amenaza por avenida torrencial

Probabilidad de ocurrencia de flujos rápidos de alta energía compuestos por agua y sedimentos que transitan por cauces de alta pendiente (SGC, 2021).

Avenida torrencial

Flujo rápido de agua con alta concentración de sedimentos que circula por cauces de montaña, con elevada capacidad destructiva (SGC, 2021).

Factor de Seguridad (FS)

Relación entre fuerzas resistentes y fuerzas desestabilizantes en un talud. Valores menores a uno indican condición de falla (Baum et al., 2008).

Probabilidad de Falla (PF)

Proporción de realizaciones en las que el Factor de Seguridad es menor que uno, estimada mediante simulaciones probabilísticas (Alvioli & Baum, 2016).

Tiempo de concentración (Tc)

Tiempo requerido para que la escorrentía proveniente del punto hidrológicamente más alejado alcance la salida de la cuenca (Chow et al., 1994).

Curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia)

Relación matemática entre la intensidad de precipitación, su duración y su período de retorno (EPM, 2021).

Modelo TRIGRS

Modelo numérico para evaluar la estabilidad de laderas sometidas a infiltración transitoria de lluvia, basado en el modelo de talud infinito (Baum et al., 2002; 2008).

DEFINICIONES INSTITUCIONALES

DAGRD

Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres de Medellín.

DAGRAN

Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Antioquia.

DAP

Departamento Administrativo de Planeación de Medellín.

EDU

Empresa de Desarrollo Urbano de Medellín.

SIATA

Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá.

IDEAM

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

SGC

Servicio Geológico Colombiano.

ACRÓNIMOS

Acrónimo	Significado
ACA	Área con Condición de Amenaza
ACR	Área con Condición de Riesgo
AMVA	Área Metropolitana del Valle de Aburrá
CN	Curve Number
DAGRD	Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres
DAGRAN	Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Antioquia
DAP	Departamento Administrativo de Planeación
EDU	Empresa de Desarrollo Urbano
EPM	Empresas Públicas de Medellín
FS	Factor de Seguridad
HEC-HMS	*Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IDF	Intensidad-Duración-Frecuencia
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
IVET	Índice de Vulnerabilidad frente a Eventos Torrenciales
LIDAR	*Light Detection and Ranging*

Acrónimo	Significado
MDE-DEM	Modelo Digital de Elevación
PF	Probabilidad de Falla
PGA	*Peak Ground Acceleration*
POT	Plan de Ordenamiento Territorial
SCS	*Soil Conservation Service*
SGC	Servicio Geológico Colombiano
SIATA	Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá
Tc	Tiempo de Concentración
TRIGRS	*Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope Stability Model*
WoE	*Weight of Evidence*

PRESENTACIÓN

El Distrito de Medellín, en su condición de centro urbano regional ubicado en el contexto metropolitano del Valle de Aburrá, presenta un relieve montañoso, una cantidad significativa de corrientes hídricas y una expansión urbana dinámica, enfrenta un conjunto de fenómenos naturales e inducidos que representan amenazas para su territorio. La adecuada identificación, análisis y zonificación de dichas amenazas constituye un pilar fundamental de la gestión del riesgo de desastres y del ordenamiento territorial.

En Colombia, la Ley 1523 de 2012 sobre gestión del riesgo de desastres estableció la obligación de que los entes territoriales incorporen la amenaza, vulnerabilidad y riesgo en sus procesos de planificación. A su vez, el Decreto 1807 de 2014 y su compilación en el Decreto 1077 de 2015 del sector vivienda, ciudad y territorio, fijan los requisitos técnicos para la elaboración de Estudios Básicos y Estudios Detallados de amenaza en suelos urbanos, de expansión y rurales.

En este marco, la Universidad EAFIT asume la responsabilidad académica y técnica de elaborar el estudio básico de amenazas para Medellín, que sirva como insumo estratégico para la revisión del Plan de Ordenamiento Territorial. Este estudio busca apoyar tanto el diagnóstico de la situación actual para los fenómenos de movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales; así como la definición medidas de intervención para la prevención, reducción y adaptación territorial frente a amenazas naturales.

El presente documento contiene los resultados de los Estudios Básicos de Amenaza – EBA- para el Distrito de Medellín. En primer lugar, se encuentra la metodología empleada para la realización de los estudios, posteriormente la revisión de información secundaria, la cual, además de extensa fue muy importante para poder implementar los modelos para las tres amenazas evaluadas, al igual que para la incorporación de estudios de detalle realizados en el territorio Distrital.

Posteriormente, se describen las características geológicas y geomorfológicas del territorio y las variables morfométricas y físico espaciales empleadas en los modelos. La morfodinámica se elaboró a partir de registros del Departamento Administrativo de Planeación (DAP), del Departamento Administrativo de gestión de Riesgo de Desastres (DAGRD) e información de fotointerpretación. Incluyendo en los inventarios la información de los numerosos eventos que afectaron la ciudad durante el año 2025, en especial hacia el sector suroccidental.

Se realizaron los análisis hidrológicos e hidráulicos para 60 fuentes priorizadas y se realizó la zonificación de amenazas tanto para movimientos en masa como para inundaciones y avenidas torrenciales. Finalmente, se definen las zonas con condición de amenaza y riesgo y se definen las medidas de manejo para la incorporación de la gestión del riesgo en la revisión del POT.

Es importante resaltar, el trabajo conjunto y retroalimentación que brindaron al proceso los funcionarios del DAP, DAGRD, la Secretaría de Medio Ambiente y la EDU, quienes con el conocimiento del territorio aportaron información valiosa para el ajuste de los modelos, la incorporación de estudios de detalle y la definición de las medidas de manejo. En este último punto en especial, el trabajo de la universidad con el DAP permitió construir un instrumento amplio con las medidas de manejo para la gestión del riesgo a incorporar en el POT.

1 METODOLOGÍA

En el presente capitulo se encuentra un resumen ilustrativo y general de la metodología utilizada para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales en los estudios básicos de amenaza para el Distrito de Medellín, acorde con las metodologías y los criterios técnicos establecidos por el Decreto 1077 de 2015.

La amenaza por movimientos en masa se estima utilizando modelos estadísticos y de base física y a partir de la validación de los resultados desde el punto de vista estadístico y espacial, se escoge el modelo de base física por unidades de ladera por ser el que mejor representa esta amenaza para el territorio distrital.

Para inundaciones y avenidas torrenciales, se prioriza el estudio de un número de cuencas (60) donde por criterios morfométricos, registros de eventos e información del POT, se tiene reportada la ocurrencia de estos eventos. En estas cuencas se realizan análisis hidrológicos y sobre la información topográfica obtenida de un sensor LiDAR (suministrado por el Distrito) se corren los modelos hidráulicos.

Una vez se tiene la amenaza, con la información catastral e información de sensores remotos, al igual que información sobre áreas a desarrollar, se realiza la delimitación de zonas con condición de riesgo y zonas con condición de amenaza para el Distrito de Medellín, respectivamente.

Todo el proceso metodológico utilizado para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales está explicado de manera detallada en el Anexo 1.

1.1. AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

De acuerdo con el Decreto Nacional 1077 de 2015, para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa mediante estudios básicos, la escala de trabajo corresponde a 1:25.000 para suelo rural y 1:5.000 para suelo urbano, de expansión urbana y centros poblados. Para el caso de interés, correspondiente a Medellín, la modelación de la amenaza por movimientos en masa se realizó a una escala de 1:5.000 para todo el territorio distrital, empleando información base derivada de un modelo digital del terreno procesado a una resolución espacial de 1,0 m x 1,0 m de tamaño de píxel, el cual fue procesado y remuestreado a un tamaño de píxel de 5,0 m x 5,0 m. Esta resolución permitió desarrollar análisis detallados y homogéneos en el área de estudio, acordes con la escala establecida para este tipo de evaluación.

En un intento por estandarizar la terminología alrededor del riesgo y la amenaza por movimientos en masa[1], Corominas et al. (2023) definen la amenaza, en un sentido amplio, como una condición con el potencial de causar una consecuencia no deseada. Matemáticamente, la amenaza es la probabilidad de que un evento físico o condición peligrosa en particular ocurra en un área dentro de un periodo de tiempo.

La caracterización y descripción de la amenaza por movimientos en masa debe incluir su ubicación, clasificación, geometría, magnitud o intensidad, y se evalúa en términos de frecuencia de ocurrencia. La magnitud se suele expresar cuantitativamente como una media del tamaño del evento (volumen o área) y la intensidad (relacionada con el potencial destructivo del evento) con parámetros cuantitativos o cualitativos tales como velocidad máxima del evento, desplazamiento total, desplazamiento diferencial, profundidad, descarga pico por unidad de ancho o energía cinética por unidad de área (SGC, 2017).

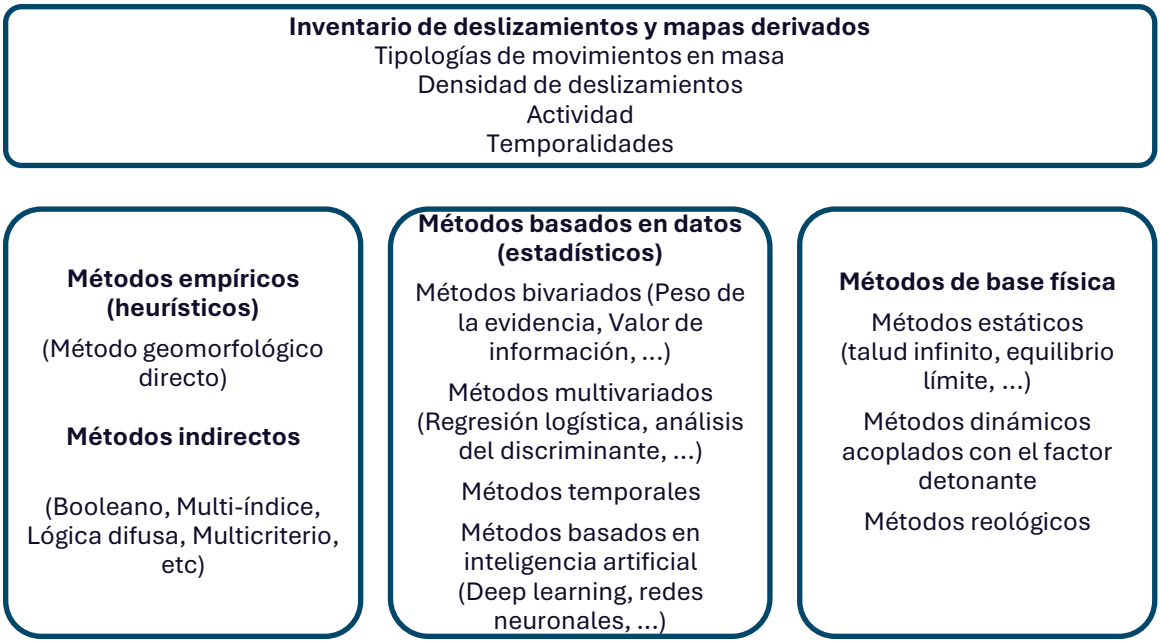


Ilustración 1. Clasificación de los métodos para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa

Fuente: Adaptado de Thiery et al. (2020)

Existen múltiples métodos para abordar el problema de la evaluación de la amenaza por movimientos en masa. Thiery et al. (2020) realizaron una revisión bibliográfica y desarrollaron una clasificación de

[1]Entendiéndose que "movimiento en masa" se refiere al término general *landslide*, cuya traducción literal es "deslizamiento", palabra que se reserva en español para referirse específicamente a los movimientos en masa denominados *slide–type landslide*.

por tipología, la cual se presenta de forma simplificada en la Ilustración 1. Independiente del método, todos se alimentan del inventario de deslizamientos, bien sea como una componente indispensable del método o como forma de calibración y/o validación. El presente estudio aborda dos de los grupos mencionado en la Ilustración 1: los métodos estadísticos y los de base física; sus generalidades discriminadas por insumos, etapa de procesamiento y productos o resultados, se resumen en la Ilustración 2 y se desarrollan en detalle en las siguientes secciones.

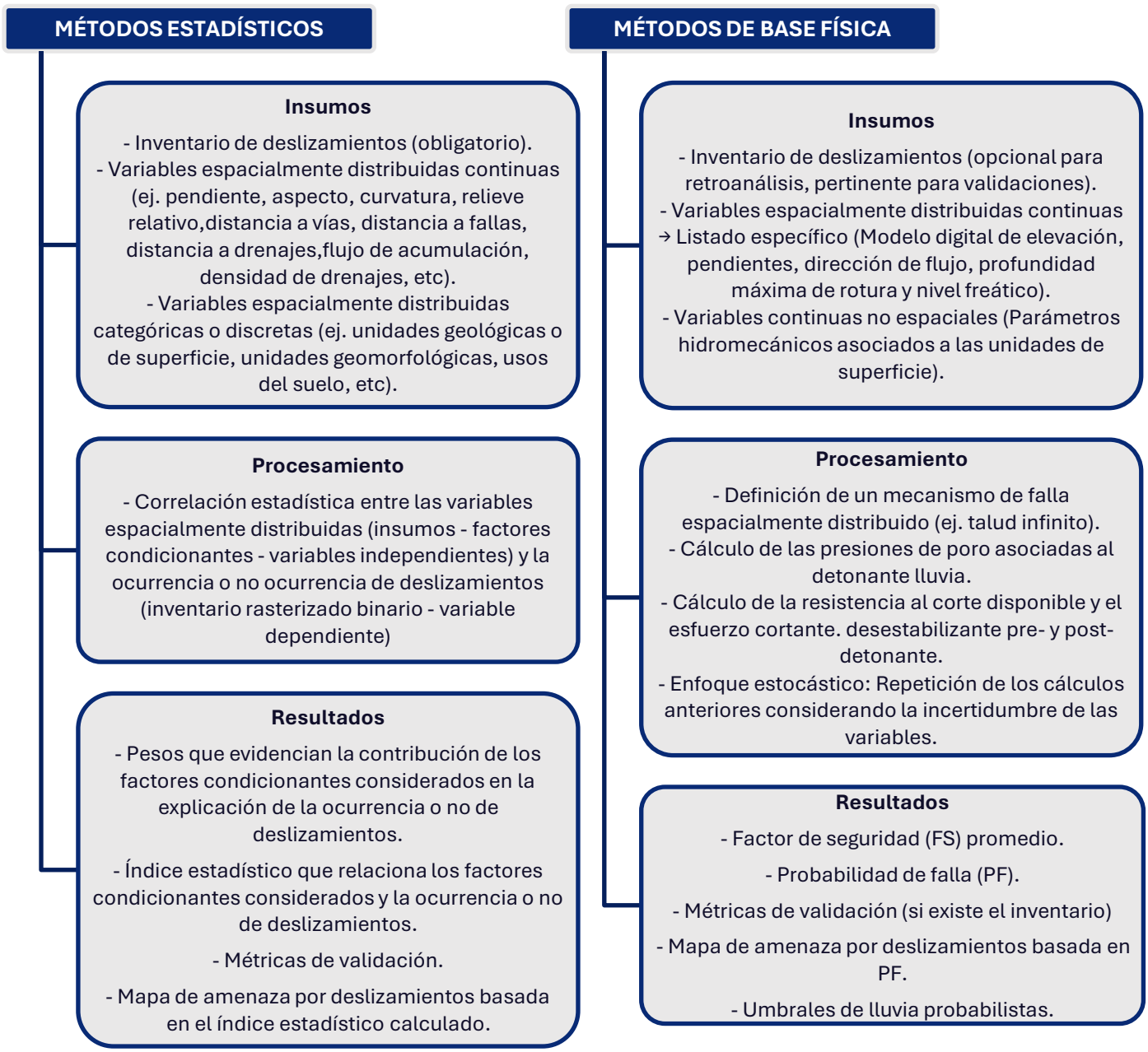


Ilustración 2. Generalidades de los métodos estadísticos y de base física

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

1.1.1 Métodos estadísticos

Los movimientos en masa son procesos que ocurren en las denominadas zonas susceptibles; entendiéndose dicha susceptibilidad como la propensión del terreno a desarrollar este tipo de fenómenos que se definen a partir de las propiedades intrínsecas del terreno. Estas se pueden caracterizar mediante unidades de parámetro y unidades de terreno: (i) la litología, (ii) el grado de meteorización, (iii) la densidad de fracturamiento, (iv) las características morfométricas, (v) la morfogénesis, (vi) la densidad de drenaje, (vii) los tipos de suelos y sus propiedades hidrofísicas, y (viii) las coberturas de la tierra.

1.1.2 Métodos de base física

1.1.2.1 Detonantes

Para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa mediante métodos de base física en la zona de estudio se utiliza el modelo TRIGRS desarrollado por Baum, Savage y Godt (2002)– (2008) y posteriormente paralelizado por Alvioli y Baum (2016). Este es un modelo cuyo nombre es un acrónimo del inglés *Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model*, y que se podría traducir y describir como un modelo para la infiltración transitoria de lluvia y la evaluación de la estabilidad de taludes en dominios regionales rasterizados. Una representación esquemática del modelo y sus parámetros se presenta en la Ilustración 3.

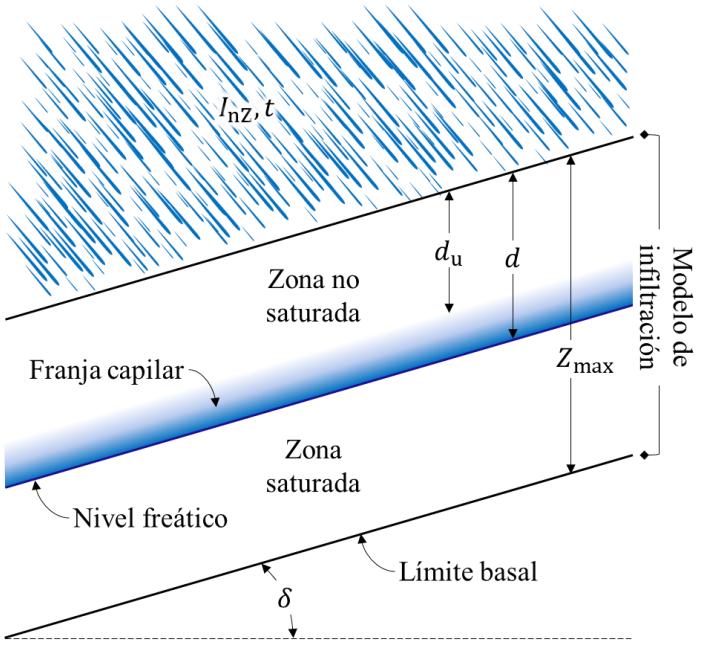


Ilustración 3. Esquema de las componentes del modelo TRIGRS

Fuente: Adaptado de Montoya–Araque y Montoya–Noguera *(2023)*, y Baum, Savage y Godt *(2008)*

La evaluación de la amenaza por movimientos en masa usando el modelo de base física descrito en la subsección precedente se basa en el flujo de trabajo metodológico que se presenta en la Ilustración 4. A continuación, se enlistan algunos detalles de la metodología propuesta.

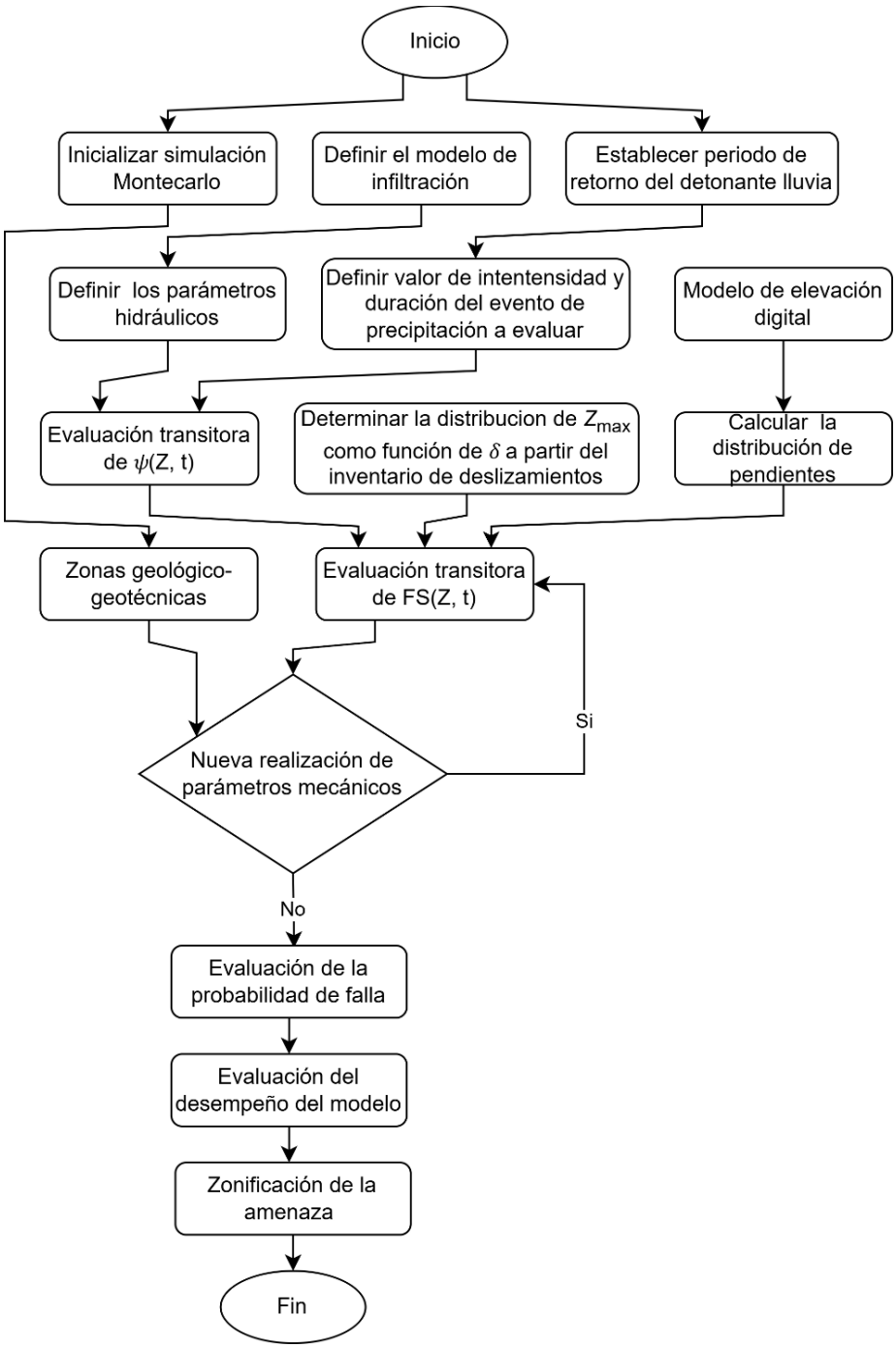


Ilustración 4. Metodología para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa a partir de la probabilidad espacial de falla

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Para la ventana de datos del presente estudio, no se incorpora el detonante sísmico ante la inexistencia de registros instrumentales de aceleraciones en el Distrito de Medellín que alcancen los umbrales comúnmente asociados a la activación de inestabilidades en laderas, por ejemplo, PGA del orden de 0.1–0.2 o mayor. Por otro lado, los inventarios existentes no registran históricamente movimientos en masa atribuibles a este detonante dentro del área de estudio. Finalmente, entre los pocos sismos regionales perceptibles y la ocurrencia de deslizamientos sísmicos locales nula, se tiene que los eventos de precipitación y la actividad antrópica explican en la práctica la totalidad de los eventos inventariados (ver sección 7.4.2).

1.1.3 Método de propagación de movimientos en masa

La modelación de propagación de deslizamientos (*runout*) se realizó mediante la implementación del paquete FlowPy (D'Amboise et al. 2022), una herramienta de código abierto desarrollada en Python para la simulación de la extensión e intensidad de masas inestables. La metodología se basará en un enfoque empírico sustentado en el concepto de ángulo de propagación (*runout angle*) y en el enrutamiento de trayectorias sobre superficies topográficas tridimensionales.

Con el fin de incorporar la incertidumbre asociada a la propagación de los deslizamientos, se llevó a cabo una evaluación probabilista mediante la generación de 300 realizaciones estocásticas. Para ello, se efectuaron muestreos aleatorios de los parámetros de control del modelo correspondientes al ángulo de propagación (α) y al exponente de concentración de rutas (*exp*). Las muestras fueron obtenidas a partir de distribuciones uniformes definidas dentro de rangos representativos, establecidos entre 15° y 35° para α y entre 1,0 y 10,0 para *exp*. Posteriormente, se elaboraron histogramas de frecuencia con el propósito de verificar la distribución y representatividad estadística de las muestras generadas.

En cada realización se seleccionó aleatoriamente un subconjunto de 1.750 unidades de ladera clasificadas previamente como amenaza alta, correspondientes aproximadamente al 5 % del total de unidades identificadas. Los centroides de dichas unidades fueron empleados como puntos fuente para la simulación de propagación de deslizamientos, permitiendo incorporar variabilidad espacial en las condiciones iniciales del modelo.

Posteriormente, el modelo fue ejecutado para cada una de las 300 combinaciones de parámetros y puntos fuente definidos, obteniendo mapas individuales de extensión de propagación simulada. Los resultados parciales generados en cada simulación fueron integrados posteriormente para calcular el índice de Probabilidad de Exposición a Propagación (PEP), definido como la relación entre el número de veces que una celda resulte afectada y el número total de realizaciones efectuadas. Este índice permitió representar la probabilidad relativa de que una determinada zona sea alcanzada por la propagación de movimientos en masa.

Con base en los valores obtenidos del índice PEP, se evaluarán cuatro escenarios de propagación correspondientes a PEP > 0 %, PEP > 10 %, PEP > 25 % y PEP > 50 %. El escenario PEP > 0 % correspondió a la condición más conservadora, al incluir todas las celdas afectadas al menos una vez durante las simulaciones, mientras que los escenarios PEP > 25 % y PEP > 50 % representaron trayectorias con mayor persistencia espacial dentro del conjunto de realizaciones probabilistas.

Para cada escenario se realizó la comparación entre las áreas de propagación obtenidas y las zonas de amenaza alta definidas previamente mediante el modelo de base física, con el fin de identificar la extensión potencial de las áreas susceptibles por efecto de la propagación. Posteriormente, se integraron los resultados de propagación con la zonificación inicial de amenaza para generar escenarios ajustados de amenaza por movimientos en masa.

Finalmente, se adoptó el escenario PEP > 10 % como escenario de referencia para la zonificación final con propagación, debido a que representa una condición intermedia entre la amplitud espacial del escenario más conservador y la restricción de los escenarios de mayor recurrencia. Este escenario permitió complementar la zonificación obtenida previamente mediante el modelo de base física, incorporando áreas con recurrencia suficiente dentro de las simulaciones probabilistas de propagación. A partir de lo anterior, se obtiene la distribución de áreas correspondientes a las categorías de amenaza alta, media y baja para cada escenario evaluado, junto con la zonificación final de amenaza por movimientos en masa con incorporación de propagación.

1.1.4 Zonificación de la amenaza por movimientos en masa

La zonificación final de amenaza por movimientos en masa se realizó mediante la integración de los resultados obtenidos a partir del modelo de base física estocástico y de la modelación probabilista de propagación (*runout*). Posteriormente, esta información se complementó con los estudios de detalle protocolizados suministrados por el Departamento Administrativo de Planeación y con los inventarios de procesos morfodinámicos provenientes del DAGRD, el SIATA y el DAP, además de los procesos identificados mediante fotointerpretación multitemporal. Los inventarios de procesos morfodinámicos harán parte integral de los análisis numéricos de zonificación y serán utilizados tanto en la calibración como en la validación espacial de los resultados. No obstante, considerando la escala regional del estudio, la incertidumbre asociada a algunos registros y la naturaleza estadística y estocástica de los modelos empleados, algunos procesos activos o significativos podrán no quedar clasificados inicialmente dentro de zonas de amenaza alta.

Por esta razón, la zonificación final se ajustó mediante la incorporación explícita de procesos morfodinámicos activos, estudios geológico-geotécnicos del DAGRD, llenos antrópicos con evidencia de inestabilidad, zonas declaradas con riesgo no mitigable y sectores con características especiales de caída de roca, con el fin de mejorar la representación espacial de la amenaza y garantizar la coherencia técnica del producto final. Por lo tanto, se elaboró el mapa final de

zonificación de amenaza por movimientos en masa del Distrito, integrando todos los componentes técnicos y cartográficos desarrollados durante el estudio.

1.2. AMENAZA POR INUNDACIÓN Y AVENIDAS TORRENCIALES

A continuación, se presenta la metodología empleada para la delimitación y zonificación de las amenazas por inundación y avenidas torrenciales a escala 1:2.000 para las zonas priorizadas del Distrito de Medellín, departamento de Antioquia, a la luz de los requerimientos por la legislación vigente correspondiente al correspondiente al Decreto 1807 de 2014, compilado en el Decreto 1077 de 2015.

El Decreto 1077 de 2015 indica que los municipios deben analizar la amenaza por avenidas torrenciales e inundaciones en el suelo urbano y en el suelo rural; de igual manera el lineamiento nacional indica las escalas de trabajo y las metodologías generales recomendadas para desarrollar cada uno de los análisis. Estos resultados permiten la incorporación de la gestión del riesgo en los diferentes instrumentos de planificación municipal.

Según (IDEAM, s.f.), las inundaciones son fenómenos hidrológicos recurrentes potencialmente destructivos, que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente. Se producen por lluvias persistentes y generalizadas que causan un aumento progresivo del nivel de las aguas contenidas dentro de un cauce superando la altura de las orillas naturales o artificiales, ocasionando un desbordamiento y dispersión de las aguas sobre las llanuras de inundación y zonas aledañas a los cursos de agua normalmente no sumergidas.

En la clasificación más sencilla se pueden identificar dos tipos: Inundaciones lentas, que son las que ocurren en las zonas planas de los ríos y con valles aluviales extensos, donde los incrementos de nivel diario son de apenas del orden de centímetros, se reportan afectaciones de grandes extensiones, pero usualmente pocas pérdidas de vidas humanas. Así mismo, el tiempo de afectación puede fácilmente llegar a ser del orden de meses.

El otro tipo de inundación son las llamadas crecientes súbitas en las que, aunque las áreas de afectación son menores, el poder destructivo es potencialmente superior y cobra el mayor número de vidas cuando se presentan. Responden rápidamente a la ocurrencia de fuertes precipitaciones en las partes altas de las cuencas, los incrementos de nivel son del orden de metros en pocas horas, y el tiempo de permanencia de estas inundaciones en las zonas afectadas son igualmente de horas o pocos días (IDEAM, s.f.) Este fenómeno es diferente a las avenidas torrenciales, puesto que en la inundación súbita hay un predominio de agua respecto a los sedimentos.

Por otra parte, las avenidas torrenciales son descritas como un flujo rápido que transita por cauces permanentes o intermitentes con pendientes longitudinales altas, que pueden ser generadas por efecto de lluvias intensas. Involucra el transporte de una mezcla de agua y un contenido significativo

de sólidos en diferentes proporciones. El aporte de sólidos al flujo puede provenir de las laderas adyacentes o del lecho de los cauces. Finalmente, cuando el flujo alcanza zonas de baja pendiente se genera el depósito del material a lo largo de su trayectoria (SGC, 2021)

Así mismo, las avenidas torrenciales se caracterizan por una falla progresiva y rápida, donde el flujo desciende formando una especie de "ríos de roca y suelo". Estos flujos comúnmente se relacionan con lluvias ocasionales de índices pluviométricos excepcionales muy altos, deshielo de nevados o movimientos sísmicos en zonas de alta montaña y la ausencia de vegetación, aunque es un factor influyente, no es un prerrequisito para que ocurran. Generalmente los flujos torrenciales corren a lo largo de cañones estrechos y cuando encuentran un área más amplia tratan de detenerse, formando abanicos de depositación, los cuales pueden sepultar áreas relativamente extensas (Suárez, 2001).

El término avenida torrencial puede considerarse como un término general que agrupa diferentes procesos de tipo gravitacional e hidrológico, que se dan en cuencas de montañas. Dentro de la propuesta de clasificación de las avenidas torrenciales elaborada por la Universidad Nacional de Colombia y DAGRAN, (2023) se consideran las características morfológicas de las cuencas y la disponibilidad de sedimentos, información que permite definir el tipo de evento que puede ocurrir en las cuencas y la cuales se describen a continuación:

> Tipo Inundación de escombros: "Corresponden a flujos torrenciales hiperconcentrados de dos fases. Las inundaciones de escombros inician como una inundación súbita, la cual aumenta su capacidad erosiva y de arrastre a lo largo del cauce y genera el aumento del volumen y concentración de sedimentos, pero estos son insuficientes para cambiar significativamente las propiedades del fluido, el cual aunque no cuenta con la energía necesaria para cargar grandes bloques cauce abajo, puede arrastrarlos a altas velocidades con gran capacidad destructiva, que en muchas ocasiones se depositan por fuera del cauce generando daños considerables.
>
> En algunas ocasiones el aporte de sedimentos se puede dar por la ocurrencia de movimientos en masa, pero estos se transportan a lo largo de cuencas de valles amplios y de pendientes moderadas, donde el aporte de agua es muy grande y los sedimentos no alcanzan a cambiar sus propiedades, marcando una diferencia entre este tipo de cuencas y las susceptibles a flujos torrenciales, tipo flujos de escombros canalizados. Son susceptibles a este tipo de eventos cuencas con características como valles anchos y vertientes amplias, y una disponibilidad de sedimentos alta" (DAGRAN, 2023).
>
> Tipo Flujo de escombros canalizados: "Son flujos torrenciales de una fase originados por flujos de escombros que se presentan sobre las laderas y que alcanzan rápidamente drenajes de orden 1 o 2, y continúan su desplazamiento. Cuando un flujo de escombros canalizado ~~Este fenómeno cuando~~ se presentan~~n~~ en forma de enjambre y se combina con inundaciones súbitas puede alcanzar la capacidad de propagarse por drenajes de orden mayor y alcanzar grandes distancias, sin embargo, de acuerdo con la proporción de agua y sedimentos, comúnmente se

transforman en flujos torrenciales tipo inundación de escombros. Se presentan cuando los eventos intensos de lluvias sobrepasan umbrales críticos, desencadenando enjambres de movimientos en masa, especialmente sobre laderas conformadas por suelos de textura arenosa y alta permeabilidad. Aunque la lluvia es el principal detonante de los movimientos en masa asociados a este tipo de avenidas torrenciales, su ocurrencia puede estar también relacionada con un sismo durante o antes de la avenida súbita" (DAGRAN, 2023).

Al igual que para las inundaciones, ~~el Decreto 1077 de 2015 indica que~~ para el análisis de amenaza por avenida torrencial se emplearon ~~deben emplearse~~ métodos estadísticos, determinísticos o probabilísticos. Los análisis para estas amenazas parten de los estudios hidrológicos e hidráulicos, sin embargo, para las avenidas torrenciales estos estudios se complementan con análisis históricos, geomorfológicos y sedimentológicos de los depósitos torrenciales asociados. La caracterización de avenidas torrenciales busca identificar y describir los componentes geomorfológicos, geológicos, morfodinámicos y morfométricos de una cuenca que están directamente involucrados en la ocurrencia de una avenida torrencial (SGC, 2021).

1.1.5 Estudio hidrológico

El estudio hidrológico se lleva a cabo mediante la estimación de parámetros morfométricos para así calcular las tormentas de diseño para las cuencas. A partir de esta información se estiman las crecientes de diseño mediante los métodos de las hidrógrafas unitarias sintéticas de Clark, *Soil Conservation Service* y Snyder, así como la aplicación del método racional probabilístico. En cuanto a las hidrógrafas unitarias sintéticas, se utiliza el software HEC – HMS v 4.9 para la transformación de la lluvia en escorrentía directa. Para este caso en particular, se determina el caudal máximo para los periodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Dadas las características del área de estudio, se evalúan diferentes puntos de control a lo largo de las cuencas y del territorio de interés, para así determinar adecuadamente la respuesta hidrológica para las vertientes.

1.1.6 Estudio Hidráulico

El estudio hidráulico busca evaluar los cambios de las variables hidráulicas a través de los canales de los drenajes localizados en el territorio de interés. Para ello se implementan los caudales de diseños que son calculados en el estudio hidrológico de las cuencas, teniendo como caudal de diseño el estimado para el periodo de retorno de 100 años para el caso de la amenaza por inundación. Para el caso de avenidas torrenciales, se tiene en cuenta las recomendaciones dadas dentro del documento: GUÍA METODOLÓGICA PARA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES, desarrollado por el Servicio Geológico Colombiano y la Pontificia Universidad Javeriana en 2021. En este aspecto, es necesario considerar los caudales líquidos complementados con el volumen sólido generado por el transporte de sedimentos y que incrementa el volumen total que transita en el tramo de interés y en especial, para un evento torrencial.

Dados los criterios técnicos recomendados en el documento SGC, 2021, y donde se requiere determinar un volumen total de aporte de sólidos final por deslizamientos, caídas de rocas y flujos, se realiza el cálculo del caudal sólido en cada sitio de control. Se tiene como límite un incremento máximo en el caudal líquido del 40%, toda vez que para caudales sólidos que superen dicho incremento del caudal líquido, el flujo no tendría un comportamiento de avenida torrencial y se comportaría como un movimiento en masa. Se toma en consideración documentos como POMCA ABURRÁ, 2006 y POMCA del río Aburrá 2018, entre otros, que indican que la carga de sedimentos en un flujo tipo torrencial, tiende a alcanzar un máximo de 40% adicional al caudal líquido. Por ello, se asume como caudales en el análisis de torrencialidad, el caudal líquido previamente indicado con una mayoración en 40%. En este análisis se realiza el cálculo hidráulico para los diferentes caudales de diseño, teniendo como prioridad en la zonificación de la amenaza por inundación a los caudales líquidos para los periodos de retorno de 25 y 100 años y para avenidas torrenciales a los caudales con periodos de retorno de 25, 100 y 3500 años incrementados por el volumen de sedimentos.

Es de indicar que el incremento de los caudales sólidos en dicho porcentaje también ha sido recomendado en los lineamientos definidos dentro del Acuerdo Metropolitano 009 de 2012 – Lineamientos Metropolitanos para la Elaboración de Estudios Geológicos, Geomorfológicos, Hidráulicos, Hidrológicos y Geotécnicos y se Dictan Otras Disposiciones para la Prevención del Riesgo en Construcción en Laderas – "Código de Laderas": (...) *Estimar, mediante al menos cuatro métodos, la creciente de diseño para los períodos de retorno de 2.33, 10, 25, 50, 100 y 500 años... De acuerdo con lo establecido en el Plan de Manejo y Ordenación de la Cuenca del Río Aburrá, POMCA, para cauces con características torrenciales, los caudales obtenidos para un periodo de retorno de 100 años deben ser mayorados en un 40%. Para el análisis de ocurrencia de caudales máximos en cauces, es crítica una adecuada definición del período de retorno. Se deben adoptar los criterios definidos en el POMCA del río Aburrá y los POMCA o PIOM de las cuencas secundarias que los tengan. Los periodos de retorno de los caudales para la delimitación de zonas de inundación deben ser: ... Determinación de zonas de inundación asociada a amenaza hídrica alta, periodo de retorno de 100 años. Para cauces torrenciales se debe mayorar un 40%. Determinación de zonas de inundación asociada a una amenaza hídrica moderada, periodo de retorno de 500 años (...)*. Estas consideraciones son tenidas en cuenta dentro del análisis hidráulico de las corrientes de interés, especialmente en cuanto a la definición de la mancha por fenómeno de inundación y avenidas torrenciales.

Se presenta la evaluación hidráulica del sistema fluvial para un escenario actual, información base para el diseño y recomendaciones desde los aspectos hidráulicos. Este análisis es realizado mediante la implementación del software HEC RAS v 6.7 (1D/2D). Evaluadas las particularidades de cada uno de los tramos de análisis, se puede definir el tipo de evaluación hidráulica, sea unidimensional o bidimensional.

1.1.7 Afluentes con evidencia de eventos por inundación que no fueron objeto de modelación hidráulica priorizada

La zonificación de amenaza por inundación en el territorio del Distrito de Medellín se sustenta de manera principal en modelaciones hidráulicas, en concordancia con los lineamientos establecidos en el artículo 2.2.2.1.3.2.1.2 del Decreto 1077 de 2015, que compiló el artículo 9 del Decreto 1807 de 2014. No obstante, la red hídrica del Distrito comprende una diversidad de afluentes y drenajes en los cuales la modelación hidráulica detallada no resulta técnicamente viable en el marco de un estudio básico, debido a la escala del análisis, la limitada disponibilidad de información hidrológica e hidráulica, o las condiciones físicas particulares del cauce, tales como tramos en cobertura hidráulica u ocupados en su sección por construcciones irregulares.

Con el propósito de asegurar la cobertura integral de la zonificación de amenaza de inundación en el territorio, se adoptó una jerarquía metodológica fundamentada en el principio de considerar información con mayor soporte técnico disponible. Dicho principio reconoce que los distintos tramos del territorio cuentan con niveles heterogéneos de información técnica y, en consecuencia, demandan métodos diferenciados que preserven el rigor de la categorización de amenaza bajo umbrales comparables y consistentes con el marco normativo vigente.

A continuación, se establece el procedimiento técnico aplicado para la determinación de la amenaza por inundación en aquellos afluentes y drenajes para los cuales se cuenta con evidencia histórica de ocurrencia de eventos de inundación, registrada a través de la base de datos del Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres (DAGRD) y de la red de monitoreo del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA), y que no fueron objeto de modelación hidráulica priorizada en el Estudio Básico de Amenazas del Distrito.

1.1.7.1 Identificación de zonas de interés a partir de información histórica y de monitoreo

Como insumo previo a la aplicación de la jerarquía metodológica, se identificaron las zonas de interés del territorio mediante la integración de dos fuentes institucionales de información.

En primer lugar, se consultó la base de datos de evaluaciones técnicas del Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres (DAGRD) del Distrito de Medellín, en la cual se registran los sitios donde se han presentado eventos de inundación documentados. Estos registros constituyen evidencia histórica de ocurrencia del fenómeno y permiten identificar los tramos del territorio en los cuales la amenaza se ha manifestado de forma efectiva.

En segundo lugar, se incorporó la red de sensores de nivel instalados por el Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA), red que en numerosos casos coincide con puntos previamente priorizados por el DAGRD. La instalación de instrumentación en estos puntos responde a la identificación técnica previa de condiciones de amenaza que justificaron la implementación de sistemas de monitoreo y alerta temprana.

Resulta pertinente precisar que ambas fuentes constituyen evidencia histórica y operativa de zonas críticas, y no una metodología de zonificación de amenaza en sí mismas. Su función dentro del procedimiento consiste en priorizar las zonas de interés sobre las cuales debe aplicarse, con el mayor rigor posible, alguno de los métodos de zonificación descritos en la jerarquía metodológica desarrollada en el numeral siguiente.

En concordancia con el procedimiento descrito, es importante señalar que en el análisis se identificaron algunos puntos reportados por el DAGRD y el SIATA que no fueron incorporados a la zonificación de amenaza, en razón de que actualmente se adelantan obras orientadas a garantizar el manejo hidráulico adecuado de dichas zonas. Un ejemplo representativo corresponde a la quebrada La Chorrera, en el corregimiento de San Antonio de Prado, sector que presenta reportes de eventos de inundación durante la temporada de lluvias del año anterior (2025) y en el cual se ejecutan, en la actualidad, obras de mitigación bajo la figura de urgencia manifiesta declarada por la Administración Distrital.

Cabe mencionar que este ajuste metodológico se sustenta en el reconocimiento técnico de que la amenaza por inundación constituye un fenómeno dinámico, cuya configuración espacial y temporal se ve modificada de forma continua por las transformaciones del territorio, la variabilidad climática y la intervención antrópica de los cauces. En consecuencia, la zonificación de la amenaza no puede limitarse a los resultados de la modelación hidráulica priorizada, sino que debe incorporar de manera explícita aquellos sectores del territorio en los cuales existe registro documentado de eventos históricos de inundación con recurrencia actual, conforme a la evidencia consolidada por el Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres y por la red de monitoreo del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá. Esta incorporación garantiza que la zonificación refleje no solo el comportamiento hidráulico teórico de los cauces, sino también la manifestación efectiva del fenómeno en el territorio, en coherencia con el principio de considerar información con mayor soporte técnico disponible, y con la naturaleza dinámica de la gestión del riesgo establecida en la Ley 1523 de 2012.

1.1.7.2 Jerarquía metodológica para la determinación de la amenaza

Para cada tramo de afluente o drenaje con evidencia de eventos de inundación que no fue priorizado en la modelación hidráulica principal del Estudio Básico de Amenazas, se aplicó la metodológica que se describe a continuación, ordenada en función de la jerarquía técnica decreciente. La selección del método aplicado a cada tramo quedó documentada en la geodatabase del estudio, lo que garantiza la trazabilidad integral del procedimiento.

Se analizan los sectores donde fueron reportados eventos de inundación considerando los siguientes niveles:

1.1.7.2.1 Nivel 1. Estudios Básicos de Amenaza y estudios de detalle existentes

En primer lugar se verificó la cobertura del tramo por las modelaciones hidráulicas contenidas en el Estudio Básico de Amenazas del Distrito de Medellín, que constituye la referencia técnica más actualizada para el ámbito distrital, así como por los estudios de detalle realizados a la fecha en el marco de procesos de revisión, licenciamiento o gestión del riesgo, siempre que cumplan los requisitos técnicos del artículo 2.2.2.1.3.2.2.5 del Decreto 1077 de 2015, sobre análisis detallado de amenaza por inundación.

En estos tramos, la zonificación se adoptó directamente de los respectivos estudios, con sus categorías de amenaza alta, media y baja establecidos en la normativa, considerando el período de retorno de cien años como umbral característico para la categoría de amenaza alta.

1.1.7.2.2 Nivel 2. Modelaciones hidráulicas del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá

En aquellos tramos en los cuales el SIATA dispone de modelaciones hidráulicas con representación de profundidad y velocidad de flujo, el equipo técnico adelantó una verificación orientada a evaluar el potencial técnico de la instrumentación instalada y la consistencia de la información generada, con el propósito de validar su incorporación como insumo directo para la zonificación. Las modelaciones referidas, desarrolladas por el SIATA en el marco de su función institucional de monitoreo y alerta temprana, constituyen un producto técnico equivalente en método al del Nivel 1 en aquellas zonas donde se evidencia la amenaza, diferenciado únicamente por su fuente institucional y por su cobertura focalizada en los puntos prioritarios para el sistema de alerta. Es preciso señalar que el SIATA dispone de este tipo de modelaciones únicamente en aquellos puntos en los cuales la información topográfica, hidrológica y operativa lo permite, por cuanto se ha estimado metodológicamente preferible disponer de información observacional verificada antes que extender la modelación a sitios con información insuficiente. En consecuencia, en los puntos donde el SIATA cuenta solamente con instrumentación de nivel y no con modelación, dicha información se trata como evidencia histórica, y la zonificación se efectúa mediante los métodos de los Niveles 3, 4 o 5, según corresponda.

1.1.7.2.3 Nivel 3. Planes Integrales de Ordenamiento y Manejo de Microcuencas

En los tramos no cubiertos por los niveles de detalle previamente definidos, se empleó como referencia la información hidrológica e hidráulica contenida en los Planes Integrales de Ordenamiento y Manejo de Microcuencas (PIOM) vigentes para las microcuencas del Distrito, elaborados mediante convenios con el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Para la incorporación de esta información se desarrolló un proceso de homologación técnica orientado a garantizar la compatibilidad entre las categorías de amenaza definidas en los PIOM y

aquellas establecidas en los Estudios Básicos de Amenaza (EBA) del Distrito. Dicho proceso consistió en verificar la equivalencia funcional entre las metodologías empleadas en ambos estudios, considerando que los EBA adoptan un criterio de intensidad hidráulica basado en la relación velocidad–profundidad del flujo (V×H), mientras que los PIOM delimitan las categorías de amenaza principalmente a partir de manchas de inundación asociadas a caudales correspondientes a períodos de retorno de 100 y 500 años.

Si bien los enfoques metodológicos difieren en el parámetro hidráulico utilizado para la categorización, ambos permiten identificar y delimitar espacialmente condiciones de susceptibilidad por inundación y establecer categorías jerárquicas de amenaza para efectos de planificación territorial. En este sentido, se verificó que la categoría de “amenaza moderada” definida en los PIOM es técnicamente homologable con la categoría de “amenaza media” establecida en los EBA, dado que ambas representan condiciones intermedias de afectación y peligrosidad hidráulica.

Cabe precisar que el Decreto 1077 de 2015 no establece la obligación de utilizar una metodología única ni criterios hidráulicos específicos para la zonificación de amenaza por inundación, sino que exige que los estudios desarrollen una delimitación técnicamente sustentada de las categorías de amenaza alta, media y baja, con base en análisis hidrológicos, hidráulicos, geomorfológicos e históricos. Por tanto, las metodologías implementadas tanto en los PIOM como en los EBA se consideran compatibles dentro del marco normativo vigente, permitiendo la articulación y empalme cartográfico de las capas de zonificación sin inconsistencias conceptuales ni restricciones técnicas para su utilización en instrumentos de ordenamiento territorial.

1.1.7.2.4 Nivel 4. Método geomorfológico complementado con caudales del Estudio Básico de Amenazas

En los tramos para los cuales no se dispuso de información proveniente de los niveles anteriores se aplicó un análisis geomorfológico fluvial, complementado con los caudales hidrológicos obtenidos en los estudios básicos de la cuenca. Este método se fundamenta en la admisibilidad expresa de los enfoques geomorfológicos para la zonificación de amenaza por inundación, prevista en el numeral 3 del artículo 2.2.2.1.3.2.1.2 del Decreto 1077 de 2015, que establece como métodos válidos los hidrológico-hidráulicos, los geomorfológicos y los histórico-geomorfológicos. El método geomorfológico reconoce que la geomorfología fluvial constituye un registro físico de la dinámica histórica del cauce y, por tanto, un indicador robusto de las zonas susceptibles a inundación.

Para este procedimiento, se desarrolló un análisis a escala de cuenca fundamentado en la delimitación hidrológica y en la estimación de caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno, conforme a los resultados consolidados en los estudios básicos. La estimación de las manchas de inundación a escala de cuenca se efectuó a partir de los caudales máximos correspondientes a los períodos de retorno de 10, 100 y 500 años, lo cual permite caracterizar el comportamiento del cauce ante eventos de frecuencia alta, intermedia y baja, y respaldar la categorización de la amenaza en sus niveles bajo, medio y alto.

Las manchas de inundación se zonifican a partir del descriptor geomorfológico HAND (*Height Above Nearest Drainage*), el cual consiste en una normalización hidrológica del Modelo Digital de Elevación (DEM), basada en el cálculo de la distancia vertical relativa entre cada celda del terreno y el drenaje hidráulicamente conectado más cercano, siguiendo las direcciones de flujo de la red de drenaje. El descriptor geomorfológico HAND se calcula en asociación a niveles de inundación definido por curvas de calibración, las cuales relacionan nivel del agua con caudal.

La obtención del HAND parte de la red de drenaje de la cuenca, el mapa de direcciones de flujo y el DEM. Los dos primeros mapas permiten identificar para cualquier celda de la cuenca cuál es su celda de destino en la red de drenaje y a partir de esta identificación se calcula la elevación relativa de determinada celda como la diferencia entre la elevación de esta y la elevación de la celda de destino ubicada sobre el canal.

A partir de la dirección de flujo y de la red de drenaje derivadas del Modelo Digital de Elevación (DEM), el algoritmo identifica el drenaje hidráulicamente conectado a cada celda del terreno y calcula la diferencia vertical entre la elevación de dicha celda y la elevación del cauce asociado. El resultado es un ráster HAND que representa alturas relativas respecto al drenaje, permitiendo identificar áreas topográficamente bajas y potencialmente susceptibles a inundación.

El descriptor requiere de una curva de calibración de geometría hidráulica para estimar la profundidad de flujo en cada sección según el caudal que tenga la misma. Se utiliza una regionalización de geometría hidráulica que sea aplicable a las condiciones hidrológicas de la zona de estudio. Esta regionalización aporta los coeficientes de la curva de calibración que relaciona el calado (profundidad) del flujo con el caudal.

Para la zona de estudio se utiliza la regionalización de geometría hidráulica desarrollada por (Posada M. y., 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:

$$H = 0.517\ Q^{0.335}$$

Con el fin de definir los diferentes niveles de amenaza, se establecen de la siguiente manera las zonas inundables para diferentes períodos de retorno, con relación a la probabilidad de ocurrencia tanto para inundación:

- Amenaza baja, asociada al período de retorno de 500 años
- Amenaza media, asociada al período de retorno de 100 años
- Amenaza alta, asociada al período de retorno de 10 años.

La selección de los períodos de retorno se fundamenta en criterios técnicos consolidados en la práctica hidrológica nacional e internacional, en concordancia con la facultad otorgada al consultor por el artículo 2.2.2.1.3.2.1.2 del Decreto 1077 de 2015 para definirlos en función de la información disponible. El período de retorno de 10 años, asociado a la amenaza alta, corresponde a eventos frecuentes con probabilidad anual de excedencia del 10%, que se materializan de manera recurrente

durante la vida útil de la infraestructura urbana. El período de retorno de 100 años, asociado a la amenaza media, constituye el estándar técnico internacional para la delimitación de la llanura de inundación con fines de planeación territorial, con probabilidad anual de excedencia del 1%. El período de retorno de 500 años, asociado a la amenaza baja, delimita la extensión máxima razonable bajo escenarios hidrometeorológicos extraordinarios, con probabilidad anual de excedencia del 0,2%.

1.1.7.2.5 Nivel 5. Zonificación POT 2014 y Tramos de cauce en cobertura hidráulica.

Finalmente, en los tramos de quebrada que no aplicaban los anteriores análisis, se complementó la zonificación con aquella que fue la incorporada en la cartografía del POT 2014, cuyo principio fue el criterio geomorfológico según se señala en el Documento Técnico de Soporte de este instrumento de planificación.

Ahora bien, en sectores del cauce en los cuales el alineamiento de la quebrada se encuentra en cobertura hidráulica, no resulta técnicamente viable aplicar los métodos descritos en los numerales precedentes, ni desarrollar modelación hidráulica con la información disponible en la escala de un estudio básico. Para estos tramos se adoptó la siguiente regla técnica: toda quebrada canalizada, embovedada o soterrada se categoriza por defecto como amenaza alta por inundación. Este análisis contempló insumo la base de datos geográfica denominada “Tquebradas”, y la ortofoto del Distrito de Medellín 2024, para verificar estos alineamientos de las coberturas hidráulicas objeto de consulta.

Esta base de datos geográfica “Tquebradas”, generada por la Secretaría de Medio Ambiente fue el consolidado de información mediante levantamientos por zonas del Distrito, incorporando capas temáticas como drenajes, geología, puntos críticos, estructuras hidráulicas y demás elementos asociados a los tramos de quebrada que incluyeron obras ejecutadas sobre los cauces. Como resultado, se publicó el “Segundo Levantamiento Integrado de Subcuencas Hidrográficas del Municipio de Medellín”, constituyéndose esta geodatabase en el principal instrumento técnico de la Secretaría para la gestión de la red hídrica, al contener información relevante sobre longitudes de tramos, materiales, secciones hidráulicas y demás características asociadas.

Se señala que, en los anteriores niveles, se pudo incluir este asunto de coberturas hidráulicas de acuerdo con la configuración o naturaleza del cauce.

2 REVISIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

Se desarrolló la revisión de 188 estudios técnicos realizados en zonas con procesos de inestabilidad del Distrito de Medellín y estudios de detalle requeridos para las zonas de condición de riesgo por el decreto Nacional 1077 de 2015 y por el decreto Municipal 0265 de 2022 (Tabla 1); insumo técnico unificado que sirve como base para la comprensión de las condiciones geológicas, hidrológicas, hidráulicas y geotécnicas del terreno (Anexo 2).

La procedencia de la información que el Distrito ha suministrado proviene de entidades como el DAGRD, el AMVA, EPM, DAP, entre otras. Los datos geográficos aparecen representados no sólo por los archivos formato SHP, sino también por GDBs asociadas a las diferentes fuentes de información como el POT, Estudios de Detalle, Microzonificación sísmica, macroproyectos, etc.

Tabla 1.Informes revisados por temática

Estudio	Número de informes
Estudios geológico -geotécnicos	85
Estudios de detalle (amenaza y/o riesgo)	91
Estudios hidrológicos e hidráulicos	30
Estudios de Microzonificación y red primaria	3
Total estudios	209

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Los estudios analizados y de acuerdo con los objetivos planteados, desarrollan temas de caracterización de las unidades litológicas y geomorfológicas, determinación de parámetros físicos y mecánicos de los materiales; análisis hidrológico e hidráulico, vulnerabilidad estructural, zonificación de amenazas y riesgo, entre otras.

Para cada estudio se elaboró una ficha que presenta una síntesis de la información general de cada estudio, consolidando los aspectos más relevantes abordados en sus diferentes capítulos, tales como condiciones geológicas, geotécnicas, hidrológicas, estructurales y de mitigación del riesgo, entre otras. Se destacan los factores determinantes para la comprensión de la problemática, así como las recomendaciones propuestas.

Adicionalmente, se tuvo en cuenta la escala de trabajo con la que fueron realizados los estudios, la cual influye directamente en el nivel de detalle, la cobertura espacial y la precisión de las observaciones. Se identificaron estudios que incluían información de diferentes escalas tanto a detalle como a nivel regional, con implicaciones directas en la confiabilidad de los mapas y las recomendaciones técnicas identificadas.

Finalmente, se revisó la existencia de información cartográfica georreferenciada, con énfasis en formatos digitales como *shapefiles* o *geodatabases* (331 GDB), que contuviera mapas temáticos relacionados con geología, amenazas, geotecnia, unidades geomorfológicas o identificación de procesos morfodinámicos. Desde el equipo SIG también se desarrolló un formato (Anexo 2) para la revisión de la información enfocado solamente en la revisión de los datos cartográficos, haciéndole algunas variaciones dependiendo del tipo de estudio (Información hidrológica e hidráulica, Estudios de Detalle, Caracterización movimientos en masa DAGRD, Estudios geológicos-geotécnicos y otras fuentes de información que presentan cartografía asociada). En esta fase su función consiste en garantizar que los datos cartográficos recibidos cumplan con los estándares de calidad, precisión y utilidad para los procesos que se realizan en las diferentes etapas del proyecto.

Como parte importante en el desarrollo de la zonificación de amenazas por movimiento en masa, inundación y avenida torrencial y la definición de las áreas con condición de riesgo, se tuvieron en cuenta los estudios detallados adoptados, algunos elaborados por entidades públicas y otros por privados, y que a su vez fueron revisados por la mesa técnica del Distrito siguiendo los lineamientos y requerimientos técnicos definidos dentro del Decreto 1077 de 2015. Esta información es de importancia toda vez que la zonificación de las amenazas y riesgos fue determinada a partir de información topográfica de detalle y, por lo tanto, para los puntos específicos donde se contó con estudios de detalle, se retomó su zonificación. En particular para inundaciones y avenidas torrenciales se tuvo en cuenta la información representada a partir del resultado en profundidad y velocidad de flujo para su posterior zonificación.

Por otra parte, el equipo de geotecnia consolidó y revisó la información técnica histórica clave para los análisis en curso, recopilando documentación fundamental que incluye las Microzonificaciones Sísmicas de Medellín (1999) y su complemento para el Valle de Aburrá (2006), el Estudio de Vulnerabilidad de Tanques de EPM (2010), información geotécnica de Solingral (2002), así como varias tesis de maestría con datos relevantes. Estos datos incluyen cientos de perforaciones que son sistematizadas para su integración en los estudios actuales (Anexo 2).

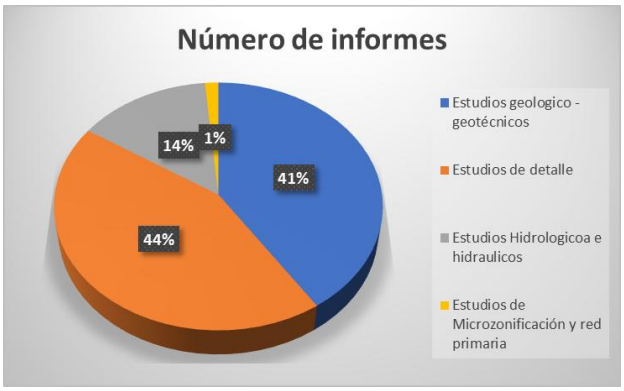


Ilustración 5. Relación de fichas de revisión de información técnica secundaria

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

3 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEOMORFOLÓGICAS REGIONALES

En los siguientes subcapítulos se desarrolla la descripción regional del componente geológico y geomorfológico del Distrito de Medellín, con base en información secundaria obtenida de las planchas 146 y 147 del Servicio Geológico Colombiano.

3.1 GEOLOGÍA REGIONAL

La evolución del Valle de Aburrá es el resultado de la interacción entre diferentes procesos tectónicos, erosivos, depositacionales y morfodinámicos. La cuenca hidrográfica por donde discurre el río Aburrá / Medellín está conformada por rocas metamórficas e ígneas y depósitos de vertiente y aluviales (Ilustración 6).

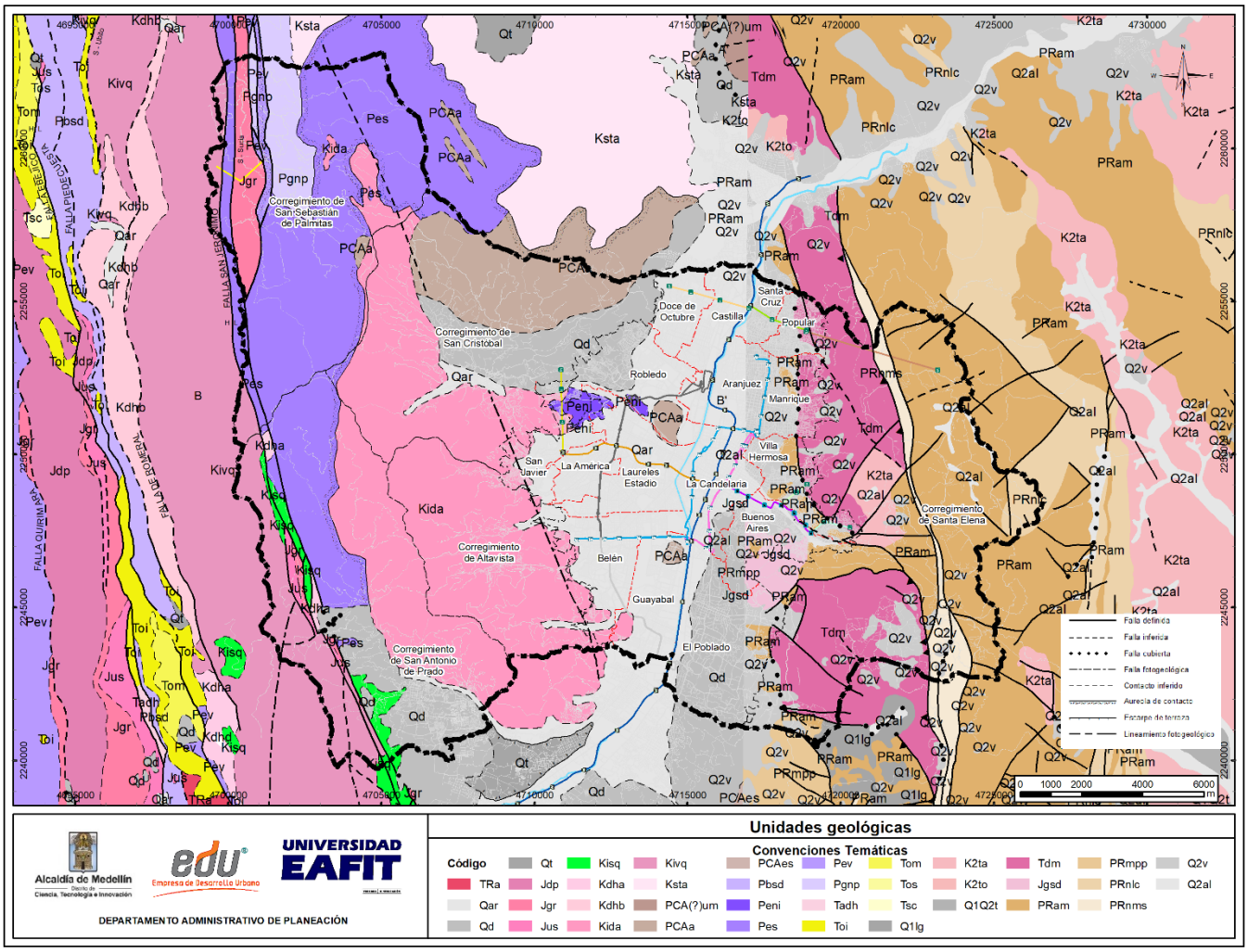


Ilustración 6. Mapa geológico regional

Fuente: Adaptado de Ingeominas (2005) y SGC (2014)

El sector septentrional de la Cordillera Central se conforma por una corteza continental de unos 45 km de espesor aproximadamente (Toussaint, 1993 en INGEOMINAS 2005) la cual ha sufrido eventos metamórficos y tectónicos desde el Proterozoico y el Cretáceo Superior, localmente presentan una cobertura sedimentaria marina del Jurásico Superior – Cretácico Inferior intruida por plutones básicos y batolitos granitoides durante el Mesozoico.

Las rocas metamórficas corresponden a anfibolitas, esquistos cuarzo-moscovíticos, gneises y migmatitas, las cuales fueron asignadas por Botero (1963) al Grupo Ayurá-Montebello (INGEOMINAS, 2005). Estas rocas exhiben en su mayoría un alto grado de meteorización, con coberturas de saprolitos de espesores variables, que poseen alta susceptibilidad a la remoción y transporte de sedimentos sobre las laderas y los canales fluviales, generando un sistema complejo de depósitos de vertiente y depósitos aluviales.

Dicho basamento metamórfico fue obducido durante el Cretácico por cuerpos alargados de composición máfica y ultramáfica (Dunitas y basaltos) y sedimentos de origen marino, los cuales estuvieron expuestos a eventos tectónicos. La Dunita de Medellín corresponde a la sección mantélica de una ofiolita incompleta, caracterizada por depósitos de cromita podiforme del subtipo harzburgita, formada en un ambiente oceánico de expansión relativa rápida y probablemente relacionada a una zona de subducción. La Dunita de Medellín está caracterizada por depósitos de cromita podiforme del subtipo harzburgita, formada en un ambiente oceánico de expansión relativa rápida y probablemente relacionada a una zona de subducción (INGEOMINAS, 2005).

Durante el Jurásico Superior – Cretácico Inferior se registra en la proto Cordillera Central un ciclo de actividad magmática que se extiende hasta el Cretácico Superior (90 a 68 Ma) y que está inicialmente representado por pequeños plutones de composición básica a intermedia y termina con el emplazamiento de grandes batolitos como el Antioqueño y plutones relacionados como el de Ovejas y Belmira en el flanco Occidental de la Cordillera Central (INGEOMINAS, 2005).

En el sector Pacifico de Sur América, con la acreción de terrenos oceánicos y las deformaciones y esfuerzos compresionales asociados se facilitó la entrada continua de corteza hidratada al manto y la deshidratación de esta a profundidad, los primeros pulsos de este magmatismo estarían representados por los magmas básicos que generaron los stocks de San Diego, Altavista y cuerpos relacionados (Ordoñez & Pimentel, 2001, en INGEOMINAS, 2005).

Durante el Cretácico tardío y Cenozoico se produjeron movimientos tectónicos que reactivaron sistemas de fallas más antiguos y afectaron la zona de sutura de la proto Cordillera Central a terrenos de afinidad oceánica al Occidente y continentales al Oriente.

Basados en información geofísica, geomorfológica, estratigráfica y geocronológica, autores como Rendón et al (2006), Aristizábal et al (2004) y Rendón (2003), plantean un modelo acoplado entre procesos tectónicos y erosivos, demostrando la ocurrencia de al menos tres cuencas tectónicas tipo pull-apart en el Valle de Aburrá. Así, las cuencas Itagüí, Medellín y Bello, presentan características morfométricas y estratigráficas diferentes, en un ambiente de deformación transpresiva de escala regional, y un relleno sedimentario controlado por un clima húmedo tropical (S. Noriega-Londoño, 2021).

Adicionalmente el carácter erosivo del valle de Aburrá es innegable teniendo en cuenta que actualmente el río principal y su amplia red de tributarios (quebradas) enlaza las diferentes cuencas tectónicas, además de conectar, vía incisión fluvial y en numerosos quiebres de pendiente las extensas y bien preservadas superficies de erosión de la Cordillera Central con el fondo del Valle de Aburrá (en S. Noriega-Londoño, 2021).

Estas superficies de erosión que conforman el amplio dominio geográfico del Altiplano Antioqueño, en el que el Valle de Aburrá está inmerso, se distribuyen de manera escalonada entre 2600 y 700 m y constituyen importantes marcadores morfotectónicos y cronoestratigráficos para documentar la

evolución del paisaje a lo largo de los eventos de levantamiento tectónico de las fases morfotectónicas Proto-Andina, en la transición OligoMioceno, y Eu-Andinas, del Mioceno temprano al tardío (en S. Noriega-Londoño, 2021).

Durante el Pleistoceno, variaciones climáticas y tectónicas contribuyeron a la formación de los depósitos de terrazas y aluviones que hoy se encuentran en algunos ríos, quebradas y depósitos lagunares en las zonas de relieve bajo y drenaje menos desarrollado. La erosión que dio a la región su configuración geomorfológica actual como producto de la degradación de unidades metamórficas e ígneas emplazadas en superficie ha sido acelerada por el levantamiento regional a través del Cuaternario y hoy en día por la actividad antrópica (Ingeominas, 2005).

3.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El Distrito de Medellín hace parte del sector septentrional de la cordillera central, estructuralmente ubicada al oriente del sistema de fallas San Jerónimo en el borde occidental en el borde occidental del Batolito Antioqueño, él cual está encajado, en este sector de los Andes de Colombia, dentro de un complejo poli metamórfico constituido por anfibolitas, neises, migmatitas y esquistos, y sobre él cual cabalgo un cinturón discontinuo de rocas ultra básicas (ver Ilustración 7).

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

El complejo sistema de fallas N-S, del sistema de falla de Romeral involucra el flanco Oriental de la ciudad y las estribaciones de las superficies de erosión; posee una moderada a baja expresión geomorfológica en la cual se dificulta su observación por la presencia de lineamientos N-W y E-W que los desplazan (AMVA, 2007).

Rendón en 1999 plantea en el área urbana de Medellín, la presencia de al menos tres grupos de estructuras tectónicas principales, las relacionadas con la obducción de una secuencia ofiolítica; las de tendencias N-S y las de tendencia N-W (AMVA, 2007).

Las estructuras tectónicas de obducción o cabalgamiento están relacionadas a un extenso cuerpo dunítico que cruza el sector Oriental de la ciudad con dirección general N-NE; el cual corresponde a una antigua escama de material ultrabásico oceánico, emplazado tectónicamente por un complejo proceso de obducción durante el Cretáceo Inferior (102 m.a., aproximadamente) sobre las anfibolitas

(Restrepo, 1986). Asociadas a este fenómeno se desarrollaron una serie de estructuras tectónicas que marcan el contacto aproximadamente sub-horizontal entre las dunitas y las anfibolitas (AMVA, 2007).

Fallas con dirección N-S a N-NW

Estructuras de falla y fajas de rocas metamórficas y ultra básicas conforman el tren regional de dirección N-S a N-NW, haciendo parte del Sistema de Fallas del Borde Occidental, y corresponden a las estructuras más orientales de este sistema.

El Sistema de Fallas N-S a N-NW influye en la dirección de las fajas de rocas metamórficas, las direcciones de foliación, la disposición de la faja de rocas ultra básicas representadas por la Dunita de Medellín y posiblemente en el contacto más occidental del Batolito Antioqueño.

Como parte del Sistema N-S a N-NW se reconocen algunas fallas de importancia regional, como las de La Acuarela, La Honda y Rodas, además, de numerosas estructuras menores de falla, pero que en conjunto con las fallas regionales del sistema constituyen las trazas más orientales del Sistema de Fallas del Borde Occidental de la Cordillera Central.

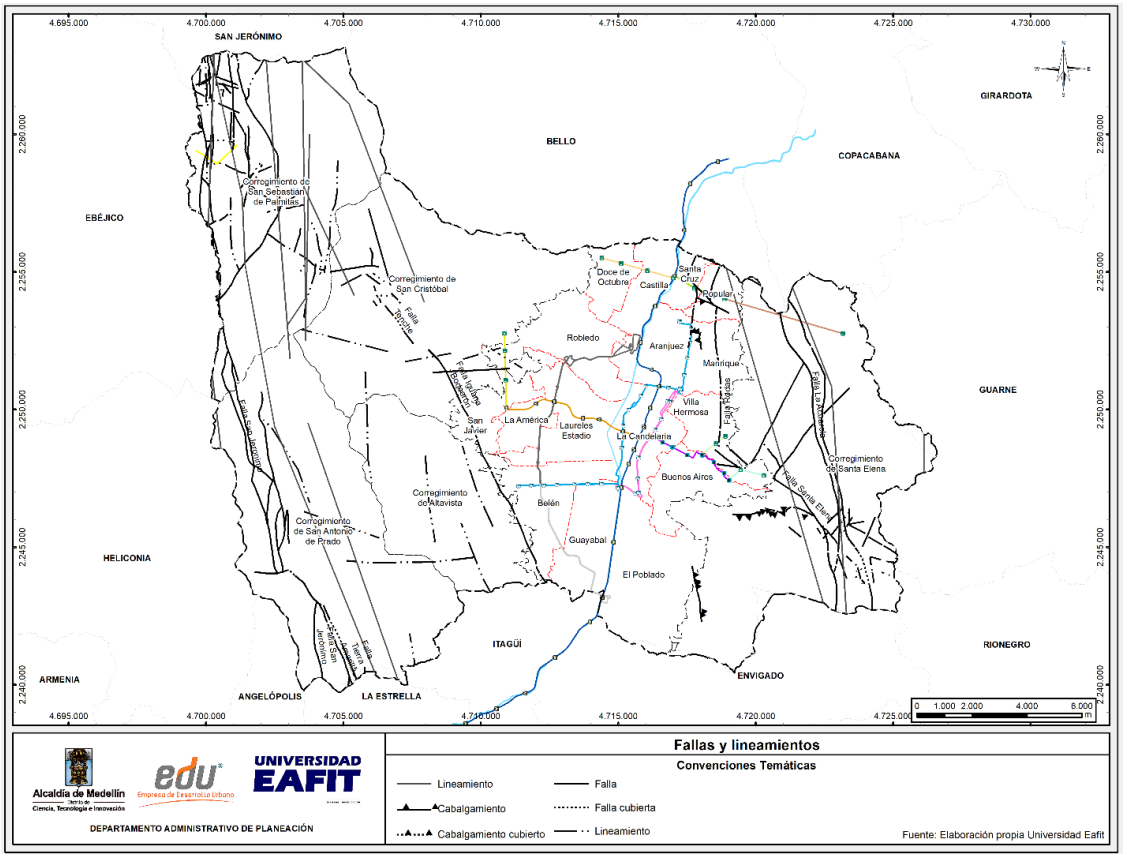


Ilustración 7 Fallas y lineamientos en el distrito de Medellín

Fuente: Adaptado de AMVA (2007)

3.3 GEOMORFOLOGÍA REGIONAL

La evolución geomorfológica regional del Valle de Aburrá está íntimamente relacionada con la evolución de las cordilleras Central y Occidental en las márgenes este y oeste del río Cauca. (Ilustración 8).

La evolución geomorfológica está relacionada de manera directa a la evolución estructural de la zona que corresponde a la margen activa del borde septentrional de la cordillera central, al oriente de la Falla Cauca-Almaguer, y genéticamente relacionada al choque del Plateau Oceánico contra la margen continental (INGEOMINAS, 2005).

Aunque existen varias teorías de la evolución de los altiplanos al oriente del Valle de Aburrá, se retoma para este estudio la interpretación evolutiva geomorfológica planteada por CORANTIOQUIA et al, 2002, basada en la hipótesis sobre el origen del relieve de los cinturones montañosos a partir de la formación de superficies de erosión denominadas como superficies de aplanamiento. Esta interpretación define los relieves de primer orden como aquellos asociados a la estructura morfológica básica de las cadenas montañosas (Arias, 1995, en CORANTIOQUIA et al, 2002), y entre los cuales se encuentran estas superficies de erosión, entendidas como una porción de terreno que se forma al nivel del mar en ambientes tropicales de clima variado y que se comporta como una planicie levemente ondulada sin grandes desniveles (CORANTIOQUIA et al, 2002).

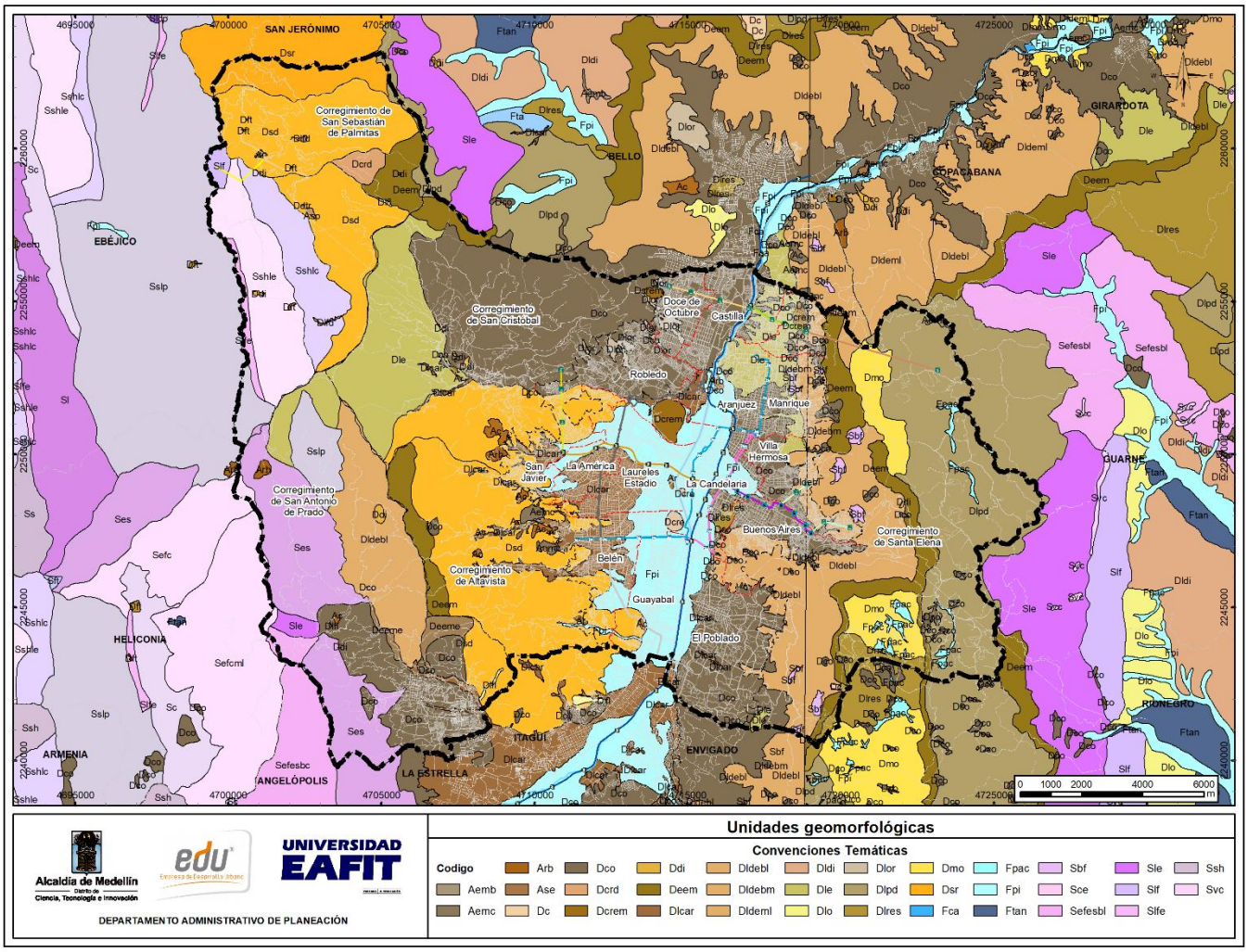


Ilustración 8. Mapa geomorfológico regional

Fuente: Adaptado de SGC (2014)

Estas planicies originales fueron afectadas tanto por procesos tectónicos e isostáticos que generaron levantamientos, o por cambios en el nivel base de la erosión, siendo afectadas a través de su levantamiento por los cambios climáticos, el resultado de estos procesos climáticos y tectónicos genera finalmente un relieve escalonado en las cadenas montañosas, el cual registra las diferentes fases de levantamiento al cual se vio sometido, permitiendo realizar una interpretación genética y cronológica de la estructura del relieve (SGC, 2014).

Regionalmente, estas superficies de erosión se encuentran ubicadas de la siguiente forma: una al norte del cañón del Rio Porce y conocida como la Superficie de erosión Santa Rosa – Santa Helena – La Unión, ubicada entre los 2200 msnm y 2800 msnm, que continua al sur del Cañón del Río Medellín-Porce a la atura de Santa Helena. Las otras dos superficies erosión se localizan al Sur del cañón del Rio Porce y son denominadas Superficie de Erosión Rionegro – La Ceja, ubicada entre los 2000 y 2200

msnm, y la Superficie de Erosión del Guatapé – El Peñol, ubicada entre los 1900 y 2000 msnm en Jurisdicción de la corporación Autónoma de los ríos Negro y Nare, esta última parece ser la continuación de la Superficie de Erosión de Guadalupe al norte del cañón del rio Porce (SGC, 2014).

Estas superficies de erosión desarrollan dos tipos de macrounidades según su estado de conservación, el altiplano conservado y el altiplano erosionado, donde se desarrollan unidades denudaciones y fluviales, principalmente, algunas unidades estructurales obedecen a la deformación asociada del Batolito Antioqueño. Las unidades denudacionales de los altiplanos conservados se caracterizan por los relieve bajo a muy bajo marcado por la incisión del drenaje formando valles amplios donde predominan los procesos erosivos asociados a los cambios en las coberturas del tierra y los usos del suelo, mientras que el altiplano erosionado hacia sus bordes con el cañón del rio Porce y el cañón del rio Cocorná, se desarrollan unidades de mayor índice de relieve con incisión más profunda definiendo valles más cerrados y en forma de “V” (SGC, 2014).

Regionalmente asociados a las unidades de altiplanos, se encuentran los escarpes regionales que obedecerían a grandes áreas que registran el escalonamiento entre altiplanos.

La continuidad de los altiplanos y escarpes se ve afectada por relieves de segundo orden como son los cañones, los cuales son valles muy profundos de hasta 900 metros de profundidad, con características morfológicas propias y donde igualmente se pueden observar los procesos de levantamiento de las cadenas montañosas, ya que estos levantamientos generan cambios en el nivel base de la erosión que se reflejan en el aumento de la incisión vertical provocando una irregularidad en las vertientes marcada por “descansos” (CORANTIOQUIA et al, 2002).

En la escala regional se observa el Cañón del Río Medellín - Porce, con dirección NE, entre los municipios de Envigado al sur y Girardota al Norte, corresponde a un “cañón” entallado entre el sistema de altiplanos Algunos estudios plantean que este cañón tiene una historia larga y compleja que permiten formular la hipótesis de que se formó en distintos momentos de la historia evolutiva de la cordillera Central, pudiendo ser contemporáneo con la formación de los altiplanos intermedios, razón por la cual sería posible encontrar, al interior del cañón geoformas que se generaron al mismo tiempo que los altiplanos más recientes (SGC, 2014).

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) y otros autores, plantean que la forma actual del cañón es el resultado de una evolución compleja en la que se entremezclan procesos tectónicos y capturas entre diferentes cuencas. A partir de esta evolución compleja del cañón del Río Medellín – Porce, se encuentran unidades denudacionales importantes como lomos denudados o ladera erosivas que se desprenden del escarpe de erosión mayor, grandes depósitos coluviales producto de los cambios climáticos del Cuaternario definiendo diferentes conos y lóbulos coluviales y de solifluxión, en detalle estos conos que están asociados a los tributarios del río Porce, indican la presencia de numerosos depósitos a veces interdigitados y coalescentes, se pueden además encontrar aterrazados como producto de rejuvenecimiento y la profundización de los cauces que les

dieron origen y del mismo río Porce (nivel de base local), debido a levantamiento tectónico reciente (INGEOMINAS, 2005).

También se encuentran en estos cañones, unidades estructurales asociadas al fallamiento, donde se desarrollan principalmente unidades de espolones festoneados o facetados, laderas estructurales, cerros estructurales, escapes de línea de falla, entre otros. Es importante destacar la actividad fluvial actual en el rio que ha dejado en el fondo de este cañón una llanura aluvial de amplitud moderada, que luego se va estrechando hacia el norte. Sobre esta dinámica fluvial, la actividad antrópica ha dejado su huella con actividad minera a lo largo del rio (SGC, 2014).

Las unidades geomorfológicas que más procesos de inestabilidad presentan corresponden a las unidades de tipo denudacional y estructural en la zona del cañón del río Medellín-Porce (SGC, 2014).

4 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEOMORFOLÓGICAS LOCALES

En los siguientes subcapítulos se desarrolla la descripción del componente geológico y geomorfológico local del Distrito de Medellín, con base en información secundaria obtenida de la Microzonificación Sísmica del Valle de Aburra (AMVA 2007 y 2016) y los estudios de detalle realizados por las diferentes instituciones a partir del decreto 1807 de 2014.

Se considera pertinente precisar que la metodología adoptada para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa en el Distrito de Medellín se fundamentó en un enfoque de modelación en base física, orientados a representar de manera explícita los factores condicionantes y detonantes de la inestabilidad de laderas. En este contexto, no se desarrolló una cartografía geomorfológica convencional a nivel de subunidades geomorfológicas para la totalidad del territorio, dado que la información geomorfológica requerida para la comprensión y representación de los procesos de movimientos en masa fue incorporada mediante variables morfométricas continuas derivadas del Modelo Digital de Elevación (DEM), la actualización de las subunidades y/o elementos geomorfológicos asociados a materiales recientes y la delimitación de Unidades de Ladera (UL), las cuales constituyeron la unidad espacial fundamental para el análisis y modelación de la amenaza. De igual forma, no se detallaron las unidades geológicas a escala 1:5.000, ya que la revisión de los parámetros geotécnicos permitió la agrupación de unidades geológicas geotécnicas que permitieron identificar dominios con afinidad litológica, genética y geomecánica que permitieron representar de manera coherente el comportamiento esperado de los materiales en los análisis de susceptibilidad y amenaza. Adicionalmente, la integración de unidades con características comparables permite contar con tamaños muestrales más amplios por zona, lo cual favorece una caracterización estadística más robusta de la variabilidad de los parámetros geomecánicos.

Como parte del proceso de construcción y validación de los modelos estadísticos empleados en el estudio, se realizó un análisis exploratorio de variables orientado a identificar aquellos factores con mayor capacidad explicativa respecto a la ocurrencia de movimientos en masa. Los resultados evidenciaron que las variables morfométricas derivadas directamente del DEM capturaban adecuadamente la influencia de la configuración geomorfológica sobre la inestabilidad de laderas, permitiendo representar de manera explícita los controles topográficos y geométricos asociados a la ocurrencia de estos procesos. Por su parte, la variable geomorfológica evaluada a nivel de unidad presentó una capacidad explicativa relativamente limitada frente a otras variables incluidas en la modelación. Adicionalmente, se observó que gran parte de la información contenida en dicha clasificación ya se encontraba representada por las variables morfométricas consideradas en el análisis. Lo anterior indica que la geomorfología, entendida como una interpretación integrada del

relieve, no aportaba información independiente significativa respecto a los factores ya incorporados en los modelos.

Por otra parte, el proceso de actualización cartográfica realizado dentro del estudio se concentró en las subunidades y/o elementos geomorfológicos asociados a materiales recientes, incluyendo depósitos de vertiente, depósitos aluviales, depósitos aluviotorrenciales y demás materiales cuaternarios presentes en el territorio. Esta actualización obedeció a la necesidad de mejorar la representación de los materiales que controlan directamente el comportamiento geotécnico e hidrológico del terreno, tales como la resistencia al corte, la infiltración, la conductividad hidráulica, la generación de presiones de poros y la profundidad potencial de falla. Dado que estos parámetros constituyen insumos directos de la modelación física, su actualización tiene una incidencia directa sobre la estimación de la amenaza y sobre la parametrización de los modelos implementados.

En este sentido, la geomorfología y geología fue incorporada mediante una representación funcional del relieve y teniendo en cuenta las características de los materiales geológicos, basado en variables cuantitativas y unidades morfométricamente homogéneas, coherente con el enfoque de modelación física adoptado.

4.1 GEOLOGÍA LOCAL

Esta variable describe los materiales que se encuentran sobre la superficie, ya sean depósitos no consolidados o rocas, desde un estado fresco hasta los suelos desarrollados a partir de la meteorización. Es sobre estos materiales superficiales que los procesos morfodinámicos tienen lugar, lo que hace que la geología sea un insumo básico para el análisis de susceptibilidad de la amenaza por movimientos en masa.

Para el desarrollo de esta variable se utiliza como insumo base la cartografía geológica existente a escala 1:10.000 del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), la cual es actualizada y redelimitada con base en la información obtenida del análisis la interpretación de fotografías aéreas, el trabajo de campo y de la cartografía geológica definida en los estudios geotécnicos y de detalle, donde es posible identificar unidades principalmente cuaternarias, como lo son los depósitos de vertientes, depósitos aluviotorrenciales, depósitos aluviales y llenos antrópicos.

Debido a que esta información fue generada con insumos cartográficos diferentes a los utilizados para base cartográfica 1:10.000, se realiza un ajuste topográfico, es decir, cada polígono de depósito que lo amerite es redelimitado por donde se evidencian contrastes del relieve, además de hacer algunas precisiones temáticas en estos mismos polígonos, a partir de las geodatabases de los estudios de detalle.

La variable geología también es alimentada, en los casos que existen estudios de detalle para el Distrito de Medellín a una escala 1:5.000 para el suelo rural y 1:2.000 para el suelo urbano, con las unidades geológicas definidas, según la pertinencia de estas.

Litológicamente el Distrito de Medellín está conformado por rocas metamórficas representadas por el Complejo Cajamarca con los Esquistos de Cajamarca (TReC) y el Grupo El Retiro, con las Anfibolitas de Medellín (TRaM), los Esquistos Anfibólicos de Baldías (TReaB), el Gneis de La Ceja (TRgLC) y las Migmatitas de Puente Peláez (TRmPP). Además, aflora el Gneis de Palmitas (TRgP), la Milonita de La Iguaná (JmI) y el Gneis Milonítico de Sajonia (JKmgS). Dentro de las rocas ígneas, aflora la Peridotita de Romeral (KuR) y el Gabro de Romeral (KgR) y las rocas del Complejo Ofiolítico de Aburra con las Dunitas de Medellín (JKuM) y las Metabasitas del Picacho (JKmbP). Dentro de las rocas volcanosedimentarias está el Complejo Quebradagrande con su miembro volcánico y volcanosedimentario (KvQG, KvsQG). Y finalmente, dentro del basamento rocoso del Distrito de Medellín aparecen intrusivos cretáceos como el Batolito Antioqueño (KcdA), el Stock de Las Estancias (KcdE), el Stock de Medialuna (KcdML), el Stock de Altavista (KdA), el Batolito de Ovejas (KtO) y el Gabro de San Diego (KgSD). Suprayaciendo todas estas unidades de roca se presentan unidades superficiales caracterizadas por depósitos de vertiente (deslizamiento, flujos de lodos y escombros, flujos de escombros y flujos), depósitos aluviales y aluviotorrenciales, y finalmente llenos antrópicos (Ilustración 9).

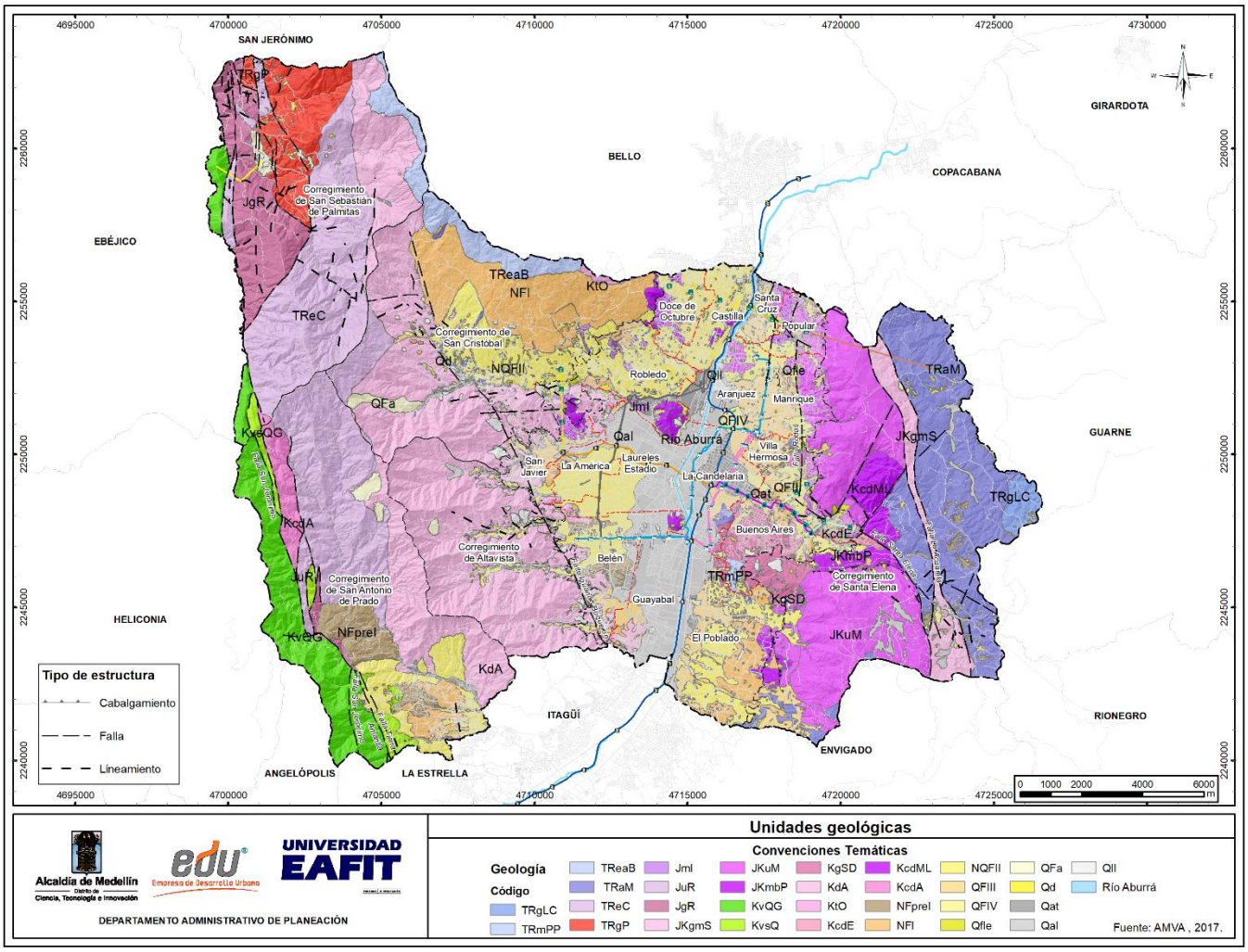


Ilustración 9. Mapa de unidades geológicas locales del Distrito de Medellín

Fuente: Adaptado de AMVA (2007)

4.1.1 Esquistos de Cajamarca (TReC)

Bajo este nombre se agrupan esquistos cuarzo-sericíticos, cloríticos y grafitosos o negros del Complejo Cajamarca. La roca más abundante corresponde a esquistos cuarzo-sericíticos, con textura foliada, orientación paralela en láminas micáceas, brillo sedoso sobre superficies de foliación y bandeo composicional de sericita y cuarzo. Los esquistos cuarzo-sericíticos muestran un desarrollo irregular de suelo de grano fino en ocasiones arenoso, dependiendo de la cantidad de cuarzo, denotándose un color verde azuloso con bandas blancas y negras. Los esquistos son competentes, algunas veces untuosos, presentan una esquistosidad muy fina dando apariencia de filita. En la proximidad con los contactos intrusivos, los esquistos presentan una textura masiva. Son comunes los lentes de cuarzo por segregación y son notables múltiples efectos metamórficos sobreimpuestos.

Esta unidad aflora en el corregimiento de Santa Elena, en el sector de la torre de incendios de las Empresas Públicas (EEPP) de Medellín, Parque Ecológico Piedras Blancas. En esta zona los esquistos son micáceos y se presentan intercalados con la anfibolita, además de presentar plegamiento y diaclasas. En esta zona del distrito se observa el horizonte V caracterizado por un material de color rojizo, con variaciones a gris oscuro y diversas tonalidades de amarillo. Este horizonte alcanza un espesor máximo de tres (3) metros.

En el sector occidental, corregimiento de San Sebastián de Palmitas, los esquistos se encuentran intercalados con paquetes de otras unidades. El cuerpo de mayor dimensión cubre un área desde la zona del Cerro del Padre Amaya y cubre un área significativa ~~Boquerón hasta~~ del corregimiento de San Sebastián de Palmitas y se extiende hasta el corregimiento de San Antonio de Prado. Este cuerpo se dispone en dirección N-NW y cruza parte de las veredas La Frisola, Las Playas, La Volcana Guayabala y el casco urbano del corregimiento de San Sebastián de Palmitas y el Astillero y Yarumalito del corregimiento de San Antonio de Prado. Otros cuerpos de menor extensión se localizan en las veredas La Aldea y Potrera. Miserenga, entre las quebradas La Volcana y La Miserenga, y en la vereda Urquitá cerca al estadero Aguacatillo. Esta unidad litológica también presenta fuertes efectos tectónicos, de hecho, las zonas de cizalla asociadas a las fallas de Romeral, San Jerónimo, muestran esquistos negros fuertemente replegados.

Perfil de meteorización: Para el corregimiento de San Sebastián de Palmitas, los horizontes que presentan mayor espesor corresponden a los horizontes I y II. Los horizontes III, IV, V y VI tienen espesores menores que no superan los dos metros. A continuación, se listan las principales características del perfil de meteorización observado en esquistos negros (AMVA, 2016):

- Horizonte VI: Material de textura limosa, en tonalidades rojizas, con espesores menores a un metro.
- Horizonte V: Se observa en zonas de quiebres de pendiente, presentan textura limosa y color pardo rojizo. Los espesores son menores a un metro.
- Horizonte IV: Alcanzan espesores de hasta tres metros y es frecuente encontrar los esquistos de color gris verdoso, altamente fracturados ligeramente plegados.
- Horizonte III: La textura es limosa con algunos bloques más competentes, generalmente presentan color pardo amarilloso; este horizonte no supera los dos metros de espesor.
- Horizonte II y I: Se trata de una roca muy competente de color gris oscuro, ocasionalmente muy fracturada, con presencia de patinas a lo largo de los planos de foliación. Espesores muy variables, desde uno a diez metros, asociados a pendientes muy fuertes (45º).

Contactos litológicos: En términos generales, se observa el contacto con las Anfibolitas de Medellín, en forma de intercalaciones de anfibolita y esquistos. El cuerpo principal en el corregimiento de San

Sebastián de Palmitas se presenta en contacto intrusivo con la diorita del Stock de Altavista. El contacto se observa en varios puntos, entre los cuales se destaca la vía antigua a Santa Fe de Antioquia, desde el Cerro Padre Amaya hasta el corregimiento de San Sebastián de Palmitas, y se caracteriza por presentar una aureola de contacto donde los esquistos exhiben un aspecto masivo, debido a efectos de recristalización. En la vereda Potrera — Miserenga, cercanías a la Finca Rancho La María, sobre la vía a Ebéjico, el cuerpo de esquistos negros y verdes se encuentra en contacto fallado con el Gabro de Romeral, ambos dispuestos en paquetes intercalados y altamente fracturados (AMVA, 2016).

El contacto entre los esquistos y el Gneis de Palmitas es de carácter intrusivo. En la vía antigua Medellín — Santa Fe de Antioquia cerca a la intersección con la vía que conduce al municipio de Ebéjico (sector el Golfo) se observa la transición entre rocas con texturas predominantemente esquistosas — cornubianas y gneis. Los esquistos presentan efectos térmicos y diferentes eventos metamórficos sobreimpuestos. Otros afloramientos de importancia donde se puede observar el contacto entre esquistos y gneises están ubicados en la vereda La Aldea, en la margen derecha de la quebrada La Causala y en la vereda Potrera — Miserenga donde se observan intercalaciones de estas dos litologías (AMVA, 2016).

Estructuras geológicas

- Esquistosidad: N30°-55°W/50°-70°SW y N45°-60°E/60°-80°SE
- Foliación: N42°E/V - S78°E/45°SW - S75°W/35°SW N30°E/68°NW - N30°E/60°SE - NS/50°W N10°W/V - S40°E/50°E - N10°E/45°W -N70°E/45°SE - N55°E/50°SE.
- Diaclasa: EW/V - N5°W/35°EN - N30°E/50°NW - S35°E/40°SW - EW/35°S.

4.1.2 Anfibolitas de Medellín (TRaM)

Definidas por Jaramillo (1971), como Anfibolitas de Medellín, están incluidas dentro del Grupo El Retiro y hacen parte del Complejo Cajamarca. Mineralógicamente están compuestas de cristales equigranulares de hornblenda y plagioclasa de tamaño medio (dos milímetros). En muestra de mano, se aprecia una roca de color oscuro que presenta variaciones texturales cerca al contacto con los Esquistos de Cajamarca y el Gneis Milonítico de Sajonia. Debido a las variaciones texturales, la anfibolita puede confundirse con el gneis anteriormente mencionado, excepto en las zonas donde el gneis tiene una composición cuarzo— biotítica muy clara y estructuras tipo augen. El cuerpo de esta unidad aparece intercalado con el Gneis Milonítico de Sajonia, que en ocasiones presenta una composición anfibólica, predominando las variaciones composicionales a gneis cuarzo-micáceo. En el sector occidental del Valle de Aburrá, las anfibolitas corresponden a una roca de grano medio, cuyos cristales son equigranulares y de formas euhedrales a subhedrales. Está compuesta esencialmente por hornblenda y feldespato. El color de la roca es negro y blanco. Son comunes las venas de cuarzo que alcanzan hasta cinco centímetros de espesor. En el corregimiento de Santa

Elena y conforma un cuerpo alargado en dirección norte-sur. Los afloramientos de mayor importancia pueden observarse en la vereda Pericos, límite con el municipio de Envigado; El Placer, vía principal, cerca la unidad básica; Barro Blanco, cerca de la unidad básica; en la entrada a la finca Paysandú, vereda el Llano; sector El Tambo, camino del Zango y vía a La Ojona; parque ecológico Piedras Blancas; vereda Media Luna, cerca al hotel La Montaña Mágica, tinca Los Cerezos; vereda El Rosario, en los sectores del instituto Parra Paris y en la vereda Las Palmas, sector de La Campanita, hacia la margen izquierda de la quebrada La Meseta en inmediaciones de las urbanizaciones Chacaltaya y Santa Catalina. También se encuentran afloramientos de Anfibolita en la vía San Cristóbal — Boquerón a la altura de la vereda Yolombo (AMVA, 2016).

Estas rocas también corresponden a secuencias de rocas cristalinas constituidas, hacia la parte del barrio El Poblado, por gneis micáceo (en inmediaciones de la Avenida Las Palmas con las Transversales Inferior y Superior) y como anfibolitas- metagabros hacia el sector sur oriental de la vertiente. El gneis micáceo aflora en general como techos colgados sobre el Stock de San Diego. Compuestos principalmente por plagioclasa, cuarzo y moscovita, presentan una coloración clara y una textura claramente bandeada. La característica fundamental de esta unidad es el alto grado de meteorización que exhibe, desarrollando suelos arenosos heterogéneos, con bolas de rocas residuales distribuidas erráticamente y con una alta susceptibilidad a los procesos erosivos. Buenos afloramientos de estos materiales se encuentran sobre la Avenida Las Palmas al frente del restaurante Asia, en inmediaciones de la discoteca La Isla y en el cruce de esta vía con la quebrada Yerbabuena, cerca de la parcelación Mirador del Poblado. Las anfibolitas están compuestas casi en su totalidad por hornblenda y plagioclasa con un poco de cuarzo y esfena, de coloración verde oscura a negra con bandas blancas. Estas rocas pueden variar texturalmente entre isotrópicas con apariencia gabróica hasta muy bandeadas, clasificables como gneis anfibólico. Estas rocas presentan un patrón de afloramiento irregular, constituyendo los lomos localizados en la parte media de la vertiente, en inmediaciones del seminario Monticello, Quintas de San Luis, urbanización La Palmera, Santa Catalina del Tesoro, y El Cortijo; más al sur en inmediaciones del colegio Parra Paris y Altos de San Lucas- Algunos afloramientos más continuos de estas rocas aparecen hacia las cabeceras de las quebradas Chacaltaya y La Meseta, por encima de la Avenida Las Palmas cerca de la parcelación Cedro Verde. Hacia la parte alta de la vertiente (parcelación Cedro Verde), los suelos residuales son mucho menos espesos y corresponden desde superficie a saprolitos limo arenosos de color gris verdosos que transicionalmente se toman en roca parcialmente meteorizada. Esta superficie rocosa constituye un rasgo desfavorable para la estabilidad en cortes de gran altura (AMVA, 2016).

Perfil de meteorización: Estas rocas se observan en estado fresco, desarrollando perfiles de meteorización de variada profundidad, en los cuales prevalecen arcillas caoliníticas y arenas ferromagnesianas concentradas en los niveles superiores, y como cantos y bloques de roca en diferentes tipos de depósitos a lo largo del área de estudio. Se compone de un nivel de suelo (VI) de

color crema a gris claro, un nivel saprolítico de color gris verdoso a pardo amarillento o pardo rojizo debido a la alteración del anfibol y algunas bandas de color blanco debido a la alteración de la plagioclasa. El perfil típico de las anfibolitas, según las observaciones de campo se presenta a seguir (AMVA, 2016):

- Horizonte VI: Suelo residual de 40 cm de espesor, color gris claro a blanco, consistencia baja, no plástico, débilmente cementado.
- Horizonte V: Roca extremadamente meteorizada con un espesor promedio de 1,50 m, color blanco moteado de negro, deleznable, consistencia firme, no plástico, débilmente cementado.
- Horizonte IV: Roca altamente meteorizada, color gris moteada de blanco, deleznable, consistencia firme, no plástico, débilmente cementado, al que no se le pudo determinar el espesor.

Otro perfil de meteorización en el corregimiento de Santa Elena corresponde a un desarrollo de los horizontes V y VI del perfil de meteorización. Los horizontes |, ll, III y IV, aunque escasos, también están presentes (AMVA, 2016).

- Horizonte VI: Se caracteriza por una granulometría fina de arcilla limosa; que no supera los dos metros de espesor. El color de este suelo residual es amarillo que, en ocasiones presenta un leve moteo blanco.
- Horizonte V: Al igual que el horizonte VI, la granulometría es, arcillo limosa y el espesor más significativo encontrado en la zona es de 3,5 m. El color consiste de motas blancas en fondo amarillo.
- Horizonte IV: Se observo con el gneis, en paquetes intercalados; por lo que el perfil de meteorización presenta características similares en ambas rocas como bandas de colores rojizos, amarillos y blancos. En este horizonte es muy común encontrar segregaciones de cuarzo lechoso.
- Horizonte I, II y III: La roca se caracteriza por el color gris oscuro, debido a la alta cantidad de hornblendas presentes. El tamaño promedio de las hornblendas es grano medio.

En el corregimiento de San Sebastián de Palmitas, las anfibolitas se observaron en dos afloramientos, en uno de ellos como suelo residual y en el otro como roca fresca (AMVA, 2016).

- Horizonte VI: Presenta granulometría arcillosa y el color es variable entre pardo rojizo y amarillo pálido que le proporcionan al suelo un aspecto moteado. En zona de pendientes moderadas a bajas, el suelo residual no supera los dos metros de espesor.

- Horizonte I: El color de la roca es gris oscuro y blanco; se observa la orientación de los minerales. Ocurre en afloramientos de hasta siete metros de espesor.

De los estudios de detalle (Polígono Juan Pablo II, EAFIT 2017) se tienen las siguientes características del perfil de meteorización:

Se caracteriza por conformar principalmente suelos finogranulares de textura arenosa heterogéneos, predominantemente de colores café a café oscuro, con la presencia de fragmentos de rocas residuales distribuidas erráticamente y de dimensiones muy variables. Los espesores del horizonte de capa vegetal son muy pequeños, no superan los 20 cm de espesor. El suelo residual (horizonte IB) tiene una profundidad máxima de 5 m caracterizado por un material de tamaño arena (grano medio - fino) de color amarillo a ocre, con alto contenido de óxidos de Fe y Mn. No se observan características de la roca original.

Hacia la parte inferior de la zona de horizonte IC, el cual está caracterizado por ser un material muy alterado, con alta meteorización y oxidación (Fe y Mn). El tamaño de grano es areno-limoso, con presencia de fragmentos de rocas no mayores a 15 cm de diámetro. Se observan las características texturales y mineralógicas de la roca original (Anfibolita). Tiene una variación del porcentaje de matriz del 90% a 95% de matriz y de fragmentos de roca entre el 5% y 10% respectivamente. El espesor promedio de este horizonte puede ser superior a los 10 m.

Contactos litológicos: Esta unidad de roca se encuentra en contacto fallado con la Dunita de Medellín en la autopista Medellín — Bogotá a la altura del cruce de la quebrada Rodas y más hacia el sur del valle en el sector de El Poblado donde presentan un fuerte grado de fracturamiento y deformación en el contacto con las Dunitas de Medellín, lo que les confiere unas propiedades adversas en cuanto a su permeabilidad secundaria y la presencia de lisos sub-horizontales (AMVA, 2016).

En el corregimiento de Santa Elena, el contacto con la Dunita de Medellín puede observase como un cambio de pendiente a lo largo del altiplano. Este cambio de pendiente está acompañado de una serie de depósitos que se encuentran recubriendo el contacto. El contacto de la anfibolita con el Gneis Milonítico de Sajonia, se observa como intercalaciones de ambas unidades. Así mismo, el contacto con los esquistos consiste en paquetes de estos últimos dentro del cuerpo de anfibolita, tal y como se observa en la torre de incendios de las EEPP de Medellín (AMVA, 2016).

El contacto de las anfibolitas con la diorita del Stock de Altavista, que afloran en inmediaciones del Alto de Boquerón, es intrusivo.

Estructuras geológicas

- Foliación: NS/subvertical - N40ºE/50ºE - N10ºE/36ºE - N10ºW/50ºE - N60ºE/90º - N20ºW/35ºE - N45ºE/10ºE - NSÍ75ºW – N3ºW/35º.
- Diaclasas: N60ºW/30ºE - N30ºW/30ºE - N30ºE/50ºW - N60ºW/20ºE - EW/75ºS.
- Falla: N80ºW/45ºS.



Ilustración 10. Roca fracturada reportada sobre el cauce y margen izquierda de la quebrada La Iguaná

Fuente: Estudio de detalle Travesías, (Universidad EAFIT, 2020).

4.1.3 Esquistos Anfibólicos de Baldías (TReaB)

Afloran unidades de rocas metamórficas del tipo esquistos, anfibolitas y gneises en el sector del cerro Baldías. Afloramientos de esta unidad se observan en: la vía que conduce desde la vereda La Meneses a la vereda La Suiza y en la serranía Baldías vía a las antenas.

Perfil de meteorización: Se presentan en avanzado estado de meteorización, pero alcanzan a definirse esquistos anfibólicos, gneises y anfibolitas en paquetes intercalados con amplia variación textural cuya mineralogía implica un metamorfismo de medio a alto grado (AMVA, 2016).

- Horizonte V: Suelo de color principalmente rojizo, aunque puede presentar variación en el color de gris oscuro y en diversas tonalidades de amarillo, debido al bandeamiento. Esta roca alcanza un ~~e5oesor~~ espesor máximo de 2,5 m.
- Horizonte II: Roca de color blanco y gris oscuro, caracterizada por el bandeamiento composicional y tamaño de grano grueso. Es frecuente encontrar en las micas evidencias de efectos dinámicos tales como las bandas tipo "kink". Esta roca alcanza un ~~e5oesor~~ espesor máximo observado de 12 m.
- Horizonte I: Son esquistos micáceos; en algunas zonas la textura varía de esquistosa a gnéisica, presentando en este último caso un bandeamiento composicional de bandas de cuarzo y biotita intercaladas.

Contactos litológicos: Estas rocas aparecen instruidas por el Batolito de Ovejas; donde se observa el cambio del saprolito de una roca tipo granitoide a una esquistosa (AMVA, 2016).

4.1.4 Migmatitas de Puente Peláez (TRmPP)

Esta unidad hace parte del Grupo El Retiro, posee una litología predominante de gneises, compuestos por cuarzo, feldespato y biotita. La textura gnéisica revela un bandeo composicional de bandas claras y oscuras correspondientes, respectivamente, a cuarzo y/o feldespato y biotita. Aflora en la vía Las Palmas en límites con el municipio de Envigado, donde aparecen cuerpos porfídicos, de grano fino, que intruyen esta unidad. Estos diques de textura porfídica presentan dimensiones considerables con una marcada meteorización esferoidal (AMVA, 2016).

Perfil de meteorización: Estas rocas, desarrollan todos los horizontes del perfil de meteorización (AMVA, 2016).

- Horizonte VI: Se desarrollan suelos residuales amarillos y rojizos, los cuales se diferencian de los suelos residuales de otras rocas por la presencia de cuarzo y micas. La granulometría va desde un grano fino de arcilla hasta arena. El espesor máximo observado para este suelo residual es de tres metros.
- Horizonte V: Se caracteriza por el bandeamiento heredado de la roca parental, cuyas bandas son de color blanco, gris oscuro y diversas tonalidades de amarillo y rojo. Este suelo alcanza un espesor máximo de tres metros.
- Horizontes IV, III, II y I: La clasificación del gneis en cada uno de estos horizontes depende del grado de diaclasamiento alteración en las zonas de fractura.

En los estudios de detalle (Polígono Los Pisquines, Incigam 2019) se tienen las siguientes características del perfil de meteorización:

- El *nivel IB* o suelo residual es un material homogéneo de textura arcillosa plástica, de color pardo a rojizo, con ligeros brillos sedosos, se observan oxidaciones asociados a los minerales máficos, presencia de materia orgánica y raíces. No se identifica la textura parental de la roca. Se identificó en los sondeos exploratorios 1 y 4, donde el máximo espesor alcanzado es de 2 m.

- El *nivel IC* o saprolito presenta una textura limo-arcillosa; el color es rojizo con tonalidades de amarillo, de pintas negras y blancas de brillo sedoso producto de las micas. En general es muy similar al nivel anterior, se diferencia por conservar ligeramente la estructura de la roca original, definida por el bandeamiento de los minerales. Este nivel se observa en campo especialmente en el costado sur del polígono de estudio, en inmediaciones al local Medellín Paintball. Estas características son evidentes en las perforaciones, donde su espesor varía entre 12,5 m y 16,5 m. Seguido a este nivel se distingue la transición de los niveles IC y IIA a una profundidad de 19 m.

- *El nivel IIA o zona de transición de saprolito* a roca meteorizada; esta transición presenta una roca gruesa granular de color gris con pintas blancas, de brillo sedoso, con ligeras oxidaciones, abundantes cristales de cuarzo y máficos. Se distinguen oxidación y la estructura parental (bandeamiento de los minerales).

Contactos litológicos: El contacto de gneises con las anfibolitas y las dunitas se define como fallado, asociado a una zona de múltiples estructuras de falla tales como brecha (en la anfibolita) y pliegues y micro-discontinuidades en el gneis. Puede también parecer como intercalaciones con esquistos (AMVA, 2016).



Ilustración 11. Saprolito o nivel IC de la Migmatita de Puente Peláez

Fuente: Estudio de detalle Pisquines, (INCIGAM, 2019).

4.1.5 Gneis de La Ceja (TRgLC)

Hacen parte del Grupo El Retiro; se trata de una roca gnéisica compuesta esencialmente por cuarzo, feldespato y biotita. Este cuerpo corresponde a una parte de la franja delgada, que aflora en la vertiente noroccidental del río Aburrá, con dirección N30°W (AMVA, 2016).

El gneis exhibe importantes variaciones en las características texturales debido a los efectos dinámicos, hecho que explica la íntima asociación entre éstos y algunos paquetes de esquistos (AMVA, 2016).

Perfil de Meteorización Este gneis, se encuentra en afloramientos rocosos y es poco frecuente el desarrollo de saprolitos y suelos residuales (AMVA, 2016).

- Horizonte V: Corresponde a un saprolito de color amarillo claro, su textura es arenosa con algo de arcilla. El espesor máximo observado para este suelo residual es de dos metros.
- Horizontes II y I: Roca de color blanco y gris oscuro, caracterizada por el bandeamiento composicional y tamaño de grano grueso. Es frecuente encontrar en las micas evidencias de efectos dinámicos tales como las bandas tipo "kink"- Esta roca alcanza un espesor máximo observado de 12m.

Estructuras geológicas

- Bandeamiento: N10°W/22°W
- Diaclasas: N60°E/45°E – N35°E/65°W
- Zona de falla: E-W/80°E

4.1.6 Gneis de Palmitas (TRgP)

Se presenta como un cuerpo elongado en dirección N.S. Es una roca de textura grueso granular de minerales que alcanzan entre dos y cuatro milímetros, con aspecto bandeado. Está compuesta esencialmente por hornblenda, plagioclasa, biotita y cuarzo. Las bandas se encuentran composicionalmente definidas de biotita y cuarzo y por lo tanto el color de la roca consta de la intercalación de tonalidades negro y blanco. Están altamente meteorizados, sus superficies de fractura son onduladas, rellenas con material triturado, continuas y separadas entre uno y tres metros (AMVA, 2016).

A nivel de muestra de mano, presenta continuidad marcada por el bandeamiento composicional de minerales micáceos, cuarzo y feldespato. En el corregimiento de San Sebastián de Palmitas, aflora en la vereda La Frisola, sector Peñas Blancas, en las veredas La Aldea, La Potrera. Miserenga y Urquitá.

***Perfil de Meteorización*:** Para el Gneis de Palmitas se ha observado en los horizontes II a VI del perfil de meteorización, obteniendo los mayores espesores en los saprolitos y suelos residuales. En muchos casos el perfil de meteorización no es continuo y se observan cambios desde un horizonte II a un saprolito y suelo residual (AMVA, 2016).

- Horizonte VI: Material de textura limo arenosa de color pardo amarilloso y pardo naranja- Sus espesores no superan los dos metros en zonas de pendientes moderadas a bajas.
- Horizonte V: Saprolito que conserva la textura original de la roca, disgrega como arena gruesa y presenta coloraciones amarillo pálido, pardas, blancas y negras. Ocasionalmente se aprecia una relación transicional entre los horizontes IV y V (transición suelo — roca). Este suelo alcanza hasta unos ocho metros de espesor.
- Horizonte IV: Poco común y cuando se desarrolla, su espesor no supera los seis metros, presenta un color amarillo pálido, pardo y rojizo. Conserva la textura original de la roca con sus minerales característicos.
- Horizontes III y II: Ocurre en afloramientos de hasta 10 m, asociados a zonas de pendientes moderadas (superior a 25º). La textura de la roca es gnéisica a bandeada cuyos colores varían entre blanco, negro y amarillo pardo. Es notable la presencia de diques de cuarzo que alcanzan 10 cm de espesor y el alto grado de fracturamiento de la roca.

Contactos litológicos: En la vía al túnel, se encuentra el contacto fallado entre el Gabro de Romeral y el Gneis de Palmitas. En la antigua vía Medellín - Santa Fe de Antioquia en inmediaciones de la vereda Urquitá se aprecia el contacto intrusivo entre esta unidad y los esquistos. En la aureola de contacto se observa recristalización y cornubianas cubriendo longitudes mayores a 10 m. Se infiere que al menos un evento metamórfico afectó a ambas unidades. La diorita del Stock de Altavista se aprecia como un cuerpo intrusivo en forma de diques y venas dentro del gneis en el corregimiento de San Sebastián de Palmitas, además de la ocurrencia de xenolitos de gneis incluidos en el cuerpo diorítico (AMVA, 2016).

Estructuras geológicas

- Foliación: N40°E/60°E - EW/20°N - N10°E/30°E
- Diaclasas: N30°E/60°E - N8°E/90° - N35°E/75°E - N30°W/40°EN - S70°E/70°SW - N15°W/77°SW - N33°W/35°E - N55°E/35°SW - N65°W/V - N19°E/84°W - N60°E/43°W
- Bandeamiento: N15°E/55°NW - S80°W/60°NW
- Falla: N12°E/66°E

4.1.7 Milonita de La Iguaná (Jml)

Corresponde a un gneis feldespático con cuarzo, puede presentarse como diques y venas dentro de las metabasitas. Por meteorización desarrolla suelos residuales con espesores variables, que pueden superar los 15 m. Los terrenos desarrollados sobre esta unidad litológica son susceptibles a la erosión laminar y concentrada, evidenciada por una gran cantidad de cicatrices de surcos y cárcavas, en especial hacia los sectores donde se explotan como material para la elaboración de tuberías y adoquines (AMVA, 2016).

Aflora principalmente en el corregimiento de San Cristóbal, a lo largo de la quebrada la Iguaná, parte alta del barrio Calasanz, Barrizal y en sector de Indural.

***Perfil de Meteorización*:** Corresponde inicialmente a un suelo de carácter limoso con variaciones a arenas finas de colores claros, intercalados con otros limo-arenosos de color gris azuloso (provenientes de la anfibolita). En ocasiones se observan bloques de roca fresca embebidos en matriz saprolítica de carácter limo-arenoso (AMVA, 2016).

- Horizonte III: Es de carácter limoso con fracciones más arenosas de constitución cuarzosa principalmente, las coloraciones van desde blancas pasando por amarillentas y rosadas. Los espesores van hasta los 12 metros.
- Horizonte II-I: Es de textura limo arenosa, color amarillo rojizo y blanco, se define claramente la textura de la roca.
- En los estudios de detalle (Polígono El Pesebre, EAFIT 2017) se tienen las siguientes características del perfil de meteorización:

El nivel I o suelo residual es de textura limo-arcillosa, color crema - rojizo claro con variación a crema claro; el material está completamente alterado donde hay poca evidencia de la roca parental y no se conserva la estructura de ésta. Este nivel alcanza una profundidad de 15 m, además se identifica sobre el corte de la calle 58 B, donde está interdigitado con los flujos de lodos y/o escombros, que parecen seguir la paleotopografía.

El nivel IC o saprolito se caracteriza por una textura limo arenosa, con variaciones del color, entre café claro, crema y grisáceo con abundantes oxidaciones y tonos rojos y rosados con pintas blancas. En general, es fácilmente disgregable y se presentan remanentes de la roca orientada. El espesor promedio identificado en los sondeos exploratorios es de 8 m, y se identifica principalmente entre la calle 58B y la parte baja de la ladera, en la porción más oriental del polígono de análisis por movimientos en masa.

La roca moderadamente meteorizada, se caracteriza por ser una roca maciza blanca con minerales verdes, están bien orientados y definen el bandeamiento de la roca. En campo se presenta diaclasada y en los sondeos se observa fracturada. El mejor afloramiento se encuentra sobre la margen derecha de la quebrada La Iguaná a la altura del puente peatonal Antonio Roldán.



Ilustración 12. Afloramiento roca alterada de Milonita de la Iguaná, margen derecha de la quebrada La Corcovada
Fuente: Estudio de detalle Cucaracho, (Universidad EAFIT, 2021)

4.1.8 Peridotitas de Romeral (JuR)

Hace parte del Complejo Ofiolítico de Romeral. Incluye serpentinitas y dunitas serpentinizadas que se observan al sur del valle de Aburrá, fuertemente fracturadas, en contacto fallado con las unidades adyacentes, generando silletas alineadas en el paisaje. La morfología es de cimas redondeadas y pendientes fuertes. Es una roca afanítica, de color gris muy oscuro a verde claro satinado, decolorada parcialmente en las fracturas. En este municipio aflora en la vía que conduce a Ebéjico.

Perfil de Meteorización: El desarrollo de suelo es incipiente y se observan los horizontes II, III y VI. El horizonte VI, es de textura ausente, suelo limo arcilloso, de color negro y rojizo en ocasiones de aspecto terroso, con un espesor de 1,5 m. Los horizontes II y III están constituidos por la roca de color gris muy oscuro a negro verdoso que cuando está altamente meteorizada da el color verde claro satinado, propio de la serpentina (AMVA, 2016).

- Horizonte VI: No es muy común; sin embargo, se encuentra suprayaciendo algunos horizontes V. Se caracteriza por desarrollar una granulometría limosa en colores rojo pardusco. Los es espesores son menores a un metro.
- Horizonte V: Es de textura limosa, color verde muy claro, casi blanco. Son comunes pátinas de manganeso en forma de manchas negras. Alcanza hasta cuatro metros de espesor.

Contactos litológicos: En la vía que conduce a Ebéjico no fue posible determinar el tipo de contacto con el Gabro de Romeral. De acuerdo con lo observado en otros municipios y lo reportado en la literatura, el contacto con unidad Gabros de Romeral es fallado (AMVA, 2016).

4.1.9 Gabros de Romeral (JgR)

Esta unidad hace parte del Complejo Ofiolítico de Romeral. Es una roca compuesta por anfíboles, plagioclasa y cuarzo y minerales accesorios. Es de textura fanerítica que varía de muy fina a media, el color de la roca varía en tonos de grises. Ocasionalmente los minerales se encuentran ligeramente orientados, imprimiendo una apariencia foliada, debido a efectos dinámicos. Es importante anotar que en esta zona el gabro puede presentar una composición tanto gabróica como diorítica. Gran parte de la superficie aflorante se encuentra en estado saprolítico y alcanza hasta 40m de profundidad.

Esta unidad no presenta las características típicas del gabro, debido a su variación composicional y textural. Aflora en el extremo suroccidental del valle, forman un cuerpo alargado de dirección norte - sur limitado por contactos fallados con las unidades adyacentes. Los afloramientos más importantes de este cuerpo se encuentran en la vía a Ebéjico, desde el sector Los Micos hasta la quebrada La Sucia, en la vereda Potrera - Miserenga, cerca de la vía Aburrá — Cauca y en la vereda La Suiza, sector Peñas Blancas (AMVA, 2016).

Perfil de meteorización: El perfil generalizado está caracterizado por los siguientes horizontes (AMVA, 2016):

- Horizonte VI: Textura ausente, material limo arenoso, de color naranja, de consistencia firme y baja plasticidad. El espesor es de unos dos metros.
- Horizonte V: Textura original presente y núcleos ausentes. Suelo limo arenoso, con textura granítica, de color amarillo con motas blancas y acumulaciones| de óxidos, firme y no plástico. Espesor de seis metros.
- Horizonte IV: Suelo y núcleos de roca presentes; material limo arenoso, de color pardo amarillento, con motas oscuras, con fragmentos de roca muy meteorizada. El espesor es de 12 m.
- Horizonte III: Roca alterada. Roca de textura granítica, meteorizada de colores gris a amarillento, con oxidaciones y meteorización hacia las paredes de las discontinuidades. Espesor de tres metros.
- Horizonte II: Roca con suelo y decoloración presentes. Gabro con textura fanerítica que puede variar de grano grueso a muy fino. Cuando es de grano grueso, se identifican cristales de hornblenda y feldespato de color gris. Espesor de ocho metros.

Contactos litológicos: Este cuerpo se encuentra en contacto fallado con los esquistos, dispuestos en paquetes intercalados y altamente fracturados. En la vía a Ebéjico por la I.E León Arango Paucar, cerca de la quebrada La Potrera existe un contraste litológico entre los gabros y la Peridotita de Romeral (AMVA, 2016).

Estructuras: Se presentan fallamientos y un intenso diaclasamiento; hay presencia de salvanda con unos 20 cm de espesor y una zona de milonitización de cinco metros.

- Diaclasas: N65°E/45°NW – N20°W/50°NE.

4.1.10 Gneis Milonítico de Sajonia (JKgmS)

Corresponde a gneises y esquistos con intercalaciones de anfibolitas, fuertemente deformados. La textura gnéisica se caracteriza por un bandeamiento composicional de cuarzo, feldespato y biotita, los cuales al alterarse generan coloraciones rojizas, blancas y amarillas. Es común la presencia de estructuras tipo augen y la presencia de venas de cuarzo. La textura varia de gnéisica a esquistosa.

Estas rocas se observaron en el corregimiento de Santa Elena, en la vereda Barro Blanco, cerca de la parroquia Virgen del Carmen; vía a la vereda El Plan y sobre la vía principal Medellín-Santa Elena, cerca de Los Arrayanes, El Refugio; finca Paisandú; en la vereda El Llano; vía a Rionegro (sector El Cartucho).

Perfil de Meteorización: En el corregimiento de Santa Elena, el Gneis Milonítico de Sajonia se encontró en los horizontes IV, V y VI; predominando el horizonte V (AMVA, 2016).

- Horizonte VI: Material de granulometría arenosa, de color pardo amarilloso. Puede alcanzar dos metros de espesor.
- Horizonte V: Se caracteriza por bandeamiento de colores rojizos, amarillo, gris y pardo, tiene una granulometría arenosa y presenta venas de cuarzo. Las arenas de los “augen” sobresalen en la matriz más fina permitiendo diferenciar la textura. Puede alcanzar cinco metros de espesor.
- Horizonte IV: Al igual que el horizonte V, el horizonte IV se caracteriza por bandeamiento bien definido de colores rojizos, amarillo, gris y pardo. En este horizonte los minerales son más visibles. No es muy común, pero donde está presente alcanza espesores de un metro.

Contactos litológicos. En la literatura se reporta un contacto fallado entre el Gneis Milonítico de Sajonia y la Dunita de Medellín, el cual se observó en el sector de Santa Elena. También se reporta el

contacto del gneis con la Anfibolita de Medellín, como fallado. Sin embargo, en la vía principal de Santa Elena, cerca de El Refugio, se observaron intercalaciones entre las dos unidades (AMVA, 2016).

Estructuras: Las direcciones del bandeamiento, se encuentran modificadas por efectos tectónicos, donde los plegamientos son estructuras comunes. Adicionalmente, el grado de meteorización de esta roca no permite tomar direcciones de bandeamiento (AMVA, 2016).

4.1.11 Dunita de Medellín (JKuM)

Estas rocas, parte del Complejo Ofiolítico de Aburrá, atraviesan el valle del río Aburrá formando las laderas occidental y oriental. Mineralógicamente, se trata de una roca compuesta esencialmente por olivino como mineral primario, con contenidos menores de cromita y magnetita. El olivino presenta alteraciones parciales a tremolita y a minerales del grupo de la serpentina, como talco y clorita. En muestra de mano, es una roca afanítica, con diferentes presentaciones según su estado de alteración, desde negro en estado fresco hasta diferentes tonalidades de verde con variaciones a café y gris plomo cuando están meteorizadas o serpentinizada (AMVA, 2016).

En general, corresponde a una franja de 35 km de extensión aproximadamente, en sentido NNW, que va desde el sector de Las Palmas, límites entre los municipios de Envigado y Medellín, donde presenta mayor amplitud (cuatro kilómetros aproximadamente), hasta el sur occidente del área urbana del municipio de San Pedro de Los Milagros, sector donde se adelgaza (menos de un kilómetro de amplitud). Conforman las zonas de topografía más abrupta que se observan al oriente del valle. Particularmente para en el corregimiento de Santa Elena, la Dunita de Medellín conforma un cuerpo elongado en dirección N—S, el cual se encuentra en diferentes grados de serpentinización.

Los afloramientos representativos de esta unidad se encuentran en el parque ecológico Piedras Blancas, laguna de Guarne; en la vereda El Plan y en cercanías de Paysandú (Finca de la Universidad Nacional de Colombia). En el sector de El Poblado, las dunitas conforman las zonas de topografía abrupta, incluyendo las vertientes empinadas del flanco suroriental de la vía a Las Palmas, correspondientes a las cuencas de las quebradas La Presidenta, La Chocona, La Sanín, El Chocho, La Escopetería, Vicenza y Huasipungo. Afloramientos rocosos se presentan sobre esta vía, desde La Colegiatura hasta las inmediaciones del Colegio The New School. Sin embargo, teniendo en cuenta su composición máfica esta roca es susceptible a los procesos de alteración superficial, desarrollando comúnmente suelos residuales. Ejemplos de estos materiales pueden observarse en el sector de la vertiente localizada por debajo de la vía Las Palmas.

Perfil de Meteorización: Esta roca por lo general se encuentra extremadamente meteorizada. En las zonas con pendientes moderadas a bajas, desarrolla profundos perfiles de meteorización, cuya

característica principal es su textura arcillosa, color rojo intenso, consistencia dura, y la presencia de óxidos de hierro con hábitos botroidales y oolíticos (costras lateríticas). En las zonas con altas pendientes, los suelos son erodados continuamente debido a la escasa o nula cobertura vegetal, manteniendo la roca en un estado relativamente fresco.

El perfil de meteorización de la Dunita en el sector del altiplano es de bajo espesor, con salientes rocosas frecuentes y alta presencia de geoformas de disolución que dan lugar a dolinas, macrodolinas, uvalas y valles kársticos. El perfil en el altiplano se compone básicamente de dos zonas, el horizonte V y el horizonte I. Los perfiles representativos se encuentran en los sectores aledaños a la parte alta de la vereda Perico, límite con el municipio de Envigado y en el parque ecológico Piedras Blancas hacia la laguna de Guarne (AMVA, 2016).

- Horizonte VI: El suelo residual se caracteriza por el color pardo amarilloso de textura limosa. En la zona de estudio este horizonte no supera los 50 cm de espesor.
- Horizonte V: Corresponde al horizonte de alteración de la dunita de mayor predominio en el área del altiplano, con un espesor delgado entre uno y dos metros aproximadamente, discontinuo, incrementado un poco en zonas de alto fracturamiento de la roca. La textura es limo-arcillosa, con presencia de minerales laminados de serpentina de color verde sin alteración. Por lo regular suprayace directamente el horizonte | (roca fresca), lo cual se caracteriza por el contacto tajante con este horizonte, o presenta un ligero cambio de horizonte V a roca parcialmente descompuesta II y luego roca fresca.
- Horizonte IV: Roca muy cizallada y completamente serpentinizada de color verde. Este horizonte tiene ~~e5oesores~~ espesores máximos de dos metros.
- Horizonte III y II: Estos horizontes se diferencian entre sí por el grado de serpentinización y fracturamiento. El color de la roca es negro con alteraciones verdosas, dependiendo del grado de se serpentinización que presenten.
- Horizonte I: Aflora desde la superficie hasta menos de un metro de dicha superficie. Esta roca se encuentra asociada a geoformas de cerros o bordes del altiplano altamente afectados por la erosión. En algunos sectores, donde la roca está cerca de la superficie, puede encontrarse un horizonte de transición II, sin desarrollo de horizontes, saprolito o suelo residual.

En los estudios de detalle (polígono Villa Liliam, EAFIT 2019) se tienen las siguientes características del perfil de meteorización:

- Suelo residual – nivel IB (JKum-sr): está caracterizado por un material limo – arenoso y limo arcilloso, de color café claro y crema rojizo. En este estrato se han perdido las características de la roca. Son estos estratos los que presentan mayor susceptibilidad a movimientos en masa.

- Saprolito - nivel IC (JKum-s): se caracteriza por tener un material arenoso limosa y arenosa fina y color café – ocre, donde aún se observan las características texturales y mineralógicas de la roca dunítica.
- Roca alterada – nivel IIA (JKum-ra): este horizonte se reporta a nivel de sondeos y se observan las características mineralógicas y texturales del material parental (Dunita), se observan fragmentos de roca dentro de una matriz areno-limosa de color café claro y café rojizo. Tiene una variación del porcentaje de roca entre el 70% y 85% y matriz entre el 30% y 15% respectivamente.

Contacto litológico: Las Dunitas reposan en contacto fallado sobre las Anfibolitas de Medellín y son consideradas como la base de una secuencia ofiolítica. La presencia actual de esta secuencia obedece a procesos tectónicos probablemente de cabalgamiento mediante una obducción de edad cretácea temprana (Restrepo y Toussaint, 1974). Lo anterior, genera una zona de esquistos cloríticos actinolíticos, replegados en el contacto con las Anfibolitas de Medellín, además de mostrar una fuerte expresión geomorfológica en el cambio de pendiente de la cima de las colinas a la parte distal de las mismas. La relación anterior es debido al emplazamiento de la dunita sobre la anfibolita.

La dunita está en contacto fallado de bajo ángulo con la Anfibolita de Medellín en la quebrada Rodas (autopista Medellín—Bogotá), donde forma una franja de esquistos cloríticos con un alto replegamiento de unos seis a diez metros de espesor. Este contacto también se observa en el corregimiento de Santa Elena, parque ecológico Piedras Blancas, donde la dirección de la falla es N80ºW/45º8. La relación con los cuerpos ígneos intrusivos adyacentes no se logró observar en campo. Con el Gneis Milonítico de Sajonia, se supone un contacto fallado, por la relación de intercalación del gneis con la anfibolita. En la vereda El Plan, límites con el municipio de Envigado, la dunita subyace los depósitos de flujos. En esta zona, la dunita está altamente meteorizada y desarrolla meteorización diferencial, permaneciendo bloques frescos en medio de suelo residual del mismo material (AMVA, 2016).

En el Distrito de Medellín, el cuerpo de dunitas presenta muy pobres condiciones geotécnicas hacia las partes altas de la comuna nororiental, generadas por el alto grado de meteorización, además de la forma particular de meteorizar en bloques rocosos de abundante matriz que es fácilmente lavada por las aguas de escorrentías, esto ha generado importantes problemas geotécnicos en estas laderas.

Estructuras: Exhiben un intenso fracturamiento haciéndose más fuerte cerca de la zona de contacto con la anfibolita. Localmente llega a formar una brecha tectónica, con foliación definida por una orientación mineralógica donde se reconocen algunas venillas de posibles carbonatos.

- Falla: N80°W/45°S.

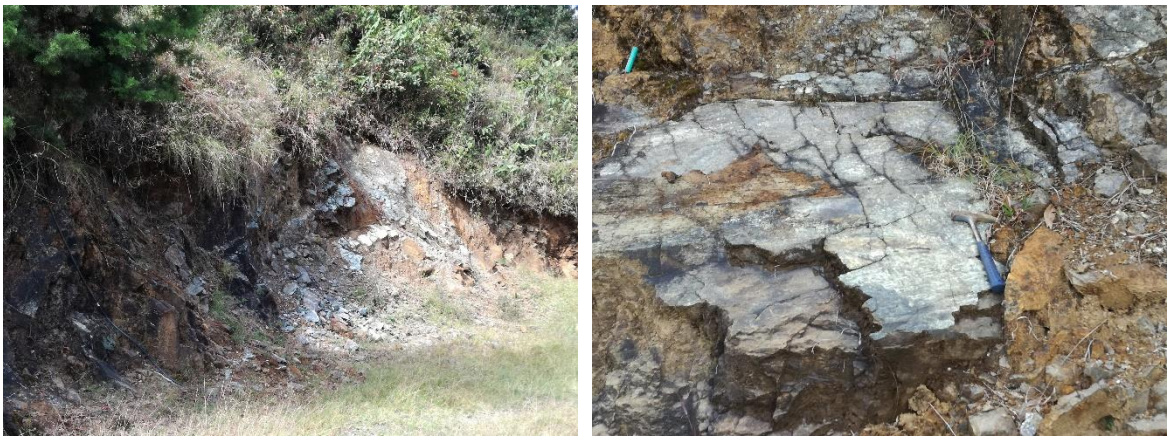


Ilustración 13. Afloramiento roca alterada en corte realizado en la finca las Nubes, sobre la vertiente sur de la quebrada La Loca

Fuente: Estudio de detalle El Faro, (Universidad EAFIT, 2019).

4.1.12 Metabasitas del Picacho (JKmbP)

Esta unidad hace parte del Complejo Ofiolítico de Aburrá y son rocas que han sufrido dos eventos metamórficos, uno dinámico y otro térmico, definiendo así la asociación de anfibolitas y metagabros. Estas rocas, en estado fresco, son de color gris moteada de blanco, presenta claras variaciones texturales, desde bandeada con alternancia de franjas claras y oscuras con orientación de los minerales máficos, hasta masiva. Mineralógicamente presenta una composición bastante homogénea de homblenda en un 65 % y plagioclasa en un 35 %.

Afloran en el cerro El Picacho de Medellín, a lo largo de la ladera occidental del valle del río Aburrá y en los alrededores de "Canteras de Colombia". Es común encontrarla en forma de ventanas erosivas en inmediaciones de la vía de acceso a la vereda Pedregal Alto, en el cruce sobre la quebrada La Bermejala, corregimiento de San Cristóbal. Allí se presenta un saprolito limo arcilloso de color variable entre gris claro, ligeramente moteado de blanco, amarillo y amarillo rojizo, consistente y de textura bandeada. El espesor de estos materiales se desconoce, pero supera los siete metros.

Perfil de meteorización: Se observa como saprolito altamente meteorizado (horizontes IV y V); en muy pocas ocasiones se logra observar la roca en estado fresco (AMVA, 2016).

- Horizonte VI: Suelo residual, con aproximadamente un metro de espesor.

- Horizonte V: Suelo altamente meteorizado, con aproximadamente tres metros de espesor; color gris claro a blanco, textura limosa, consistencia muy suave, baja plasticidad, cementación débil.
- Horizonte IV: Suelo altamente meteorizado, con un espesor de dos metros, color gris claro con variaciones a ocre claro, exhibe una consistencia suave, baja plasticidad y una cementación moderada, se observa la textura de la roca.
- Horizonte III: Roca moderadamente meteorizada, de color crema, brillo opaco, composición de plagioclasa, hornblenda, cuarzo segregado. Textura limosa, consistencia firme, baja plasticidad, cementación moderada.

En los estudios de detalle (Polígono Olaya Herrera, EAFIT 2017) se tienen las siguientes características del perfil de meteorización:

- El nivel IB o suelo residual: se caracteriza por una textura limo-arcillosa, de color variable entre color naranja - café, con pintas blancas y negras, y gris verdoso con concentraciones amarillas - crema, pintas blancas y oxidaciones. En general no se evidencia la estructura de la roca parental y en algunos pocos casos, se conservan pequeños fragmentos de núcleo de roca negra con blanca fácilmente deleznable. Se identifica en los sondeos exploratorios cuyos espesores varían entre 14 m, 12 m y 2,5 m, sobre el terreno se identifica en algunos taludes de las viviendas.
- El saprolito o nivel IC: se caracteriza por ser un material homogéneo cuyo el color característico es gris oscuro con algunas pintas blancas, y textura arena fina. Se conservan algunos fragmentos de la roca donde hay plagioclasas y anfíboles ligeramente orientados. Este nivel se identifica en algunos sondeos, a una profundidad de 10,5 m y se conserva hasta la profundidad explorada, además se identifican algunas ventanas sobre el corte de la calle 58 y de algunos taludes de las viviendas.

Contacto Litológico: Las metabasitas se encuentra en contacto intrusivo, en la parte alta de la ladera occidental, con el Batolito de Ovejas y hacia el sector occidental con el Stock de Altavista y en contacto fallado con la Dunita de Medellín, donde presenta una |estrecha relación, ya que a lo largo de la zona donde se encontró aflorando, es común encontrar algunas exposiciones superficiales de dunita follada (AMVA, 2016).

Estructuras:

- Bandeamiento y diaclasamiento: N80°E/40°W - N80°E/55°W - N65°E/60°W



Ilustración 14. Nivel IIA y roca fracturada reportada sobre la margen derecha de la quebrada Malpaso

Fuente: Estudio de detalle Aures, (Universidad EAFIT, 2019)

4.1.13 Complejo Quebradagrande (KvQG, KvsQG)

Miembro Volcánico: Litológicamente corresponden a espilitas basaltos, andesitas y tobas de lápilli; por efectos de fallamiento se encuentran diaclasadas y muy fracturadas y en ocasiones con texturas esquistosas. Esta unidad aflora extensamente en la vertiente occidental del río Aburrá en las partes medias a altas de las laderas y es cortada por numerosas vías que parten de las cabeceras municipales de Caldas y La Estrella hacia el occidente. En Medellín aflora en el corregimiento de San Antonio de Prado, sector de Potreritos, hacia los sectores de pendientes empinadas a escarpadas, donde presenta una fuerte meteorización.

Perfil de meteorización: Los suelos originados son limo-arcillosos de color rojizo a pardo amarillento, ocasionalmente con motas claras y acumulaciones de óxidos (AMVA, 2016).

- Horizonte VI: Textura ausente, en suelo limo arcilloso, de color rojo con concentraciones de óxidos de colores negros. El espesor es de cinco metros.
- Horizonte V: Textura original presente y núcleos ausentes. Suelo limo-arcilloso, con algo de arena de color rojo a naranja rojizo. Existen concentraciones de óxidos de manganeso en los planos de las diaclasas. Plasticidad media a baja, consistencia media a alta. Espesor de ocho metros.
- Horizonte IV: Suelo y núcleos de roca presentes, tienen un carácter limo-arcilloso de color naranja rojizo, observándose fragmentos de roca meteorizados de colores negros a rojos y en las paredes de las diaclasas hay pátinas y concentraciones de óxidos de manganeso. El espesor es de 15 m.

- Horizonte III: Roca alterada, con oxidación superficial; se parten en forma de paralelepípedos de dimensiones variables. Espesor de unos 20 m.

Miembro Volcanosedimentario. Son esquistos silíceos negros (compuestos de pequeños cristales de cuarzo angular), en una masa silíceo-arcillosa rica en material orgánico que le da su coloración, filitas grafitosas, liditas, algunas cuarcitas de grano fino y color oscuro, delgados conglomerados y calizas clásticas negras con escasos fósiles marinos. Algunas veces los esquistos silíceos tienen aspecto lenticular, localmente con abundante contenido de manganeso. Este miembro aflora en el corregimiento de San Antonio de Prado y el corregimiento de San Sebastián de Palmitas (AMVA, 2016).

Perfil de meteorización:

- Horizonte IV: Genera un suelo residual limoso de color amarillo pardusco.
- Horizonte V: Es un horizonte de material limoso de color verde pálido.

4.1.14 Batolito Antioqueño (KcdA)

Definido como un cuerpo macizo intrusivo de 7221 km2 de extensión, localizado en la parte central del departamento de Antioquia. La roca fresca se caracteriza por presentar textura granítica, equigranular e hipidiomórfica, de color blanco moteado de negro. Composicionalmente predominan tonalitas con variaciones locales marcadas por la disminución de cuarzo hacia granitos y dioritas.

Perfil de Meteorización: Desarrolla suelos residuales donde se define claramente la textura de la roca, y presenta un perfil generalizado con la presencia de los seis horizontes (AMVA, 2016).

- Horizonte VI: Corresponde a un limo arenoso de color rojo, amarillo rojizo o amarillo; de consistencia firme, baja plasticidad. Se diferencia fácilmente por el contenido de micas y color intenso. Se observa sobre las colinas residuales en la parte baja del valle. Espesor variable entre uno y cinco metros.
- Horizonte V: Roca extremadamente meteorizada conservando la estructura original. Las características del material suelto corresponden al horizonte VI. Los bloques, en un porcentaje aproximadamente de 10 a 20% y de dimensiones métricas, se caracterizan por presentar meteorización esferoidal, o anillos de cebolla. Espesor aproximado de cinco metros.
- Horizonte IV: Suelo altamente meteorizada, color amarillo rojizo, textura arenosa limosa, de consistencia firme, baja plasticidad, cementación moderada. Se alcanzan a distinguir en los bloques de roca sistemas de diaclasas rellenas por oxidaciones de minerales ferromagnesianos. El espesor promedio es de diez metros.

- Horizonte III: Roca moderadamente meteorizada con menos del 50% del material formando suelo. Los bloques se encuentran frescos a ligeramente meteorizados en formas redondeadas como remanentes de la meteorización esferoidal. El material suelto es de color amarillo con características
- semejantes al horizonte IV. En campo los horizontes II, III y IV en superficie, presentan apariencia de depósitos de vertientes tipo flujos, diferenciados al examinar detalladamente la matriz identificando estructuras heredadas de la roca parental. Espesor promedio de ocho metros.
- Horizonte II: Roca ligeramente meteorizada de color blanco moteado de negro y rojo, masiva de textura granítica. Se caracteriza por las alteraciones de los minerales ferromagnesianos generando pequeñas aureolas de color rojizo y cobre. Las diaclasas se encuentran rellenas por oxidaciones de hierro y arcillas tipo caolín por alteración del feldespato.
- Horizonte I: Roca fresca sin signos de meteorización. Aflorando en los cauces de las quebradas de la vertiente occidental y en escarpes formados en la parte alta de las vertientes.

Contactos litológicos: Las relaciones con los cuerpos adyacentes es intrusiva, con efectos térmicos sobre las rocas metamórficas, gneis y anfibolitas generando migmatitas de intrusión producto de la asimilación diferenciada (AMVA, 2016).

Estructuras: Se observan diaclasas y localmente orientación de minerales debido a protoclasis, originada por la deformación causada durante la intrusión sobre el magma parcialmente cristalizado, lo que produce en la roca cierta orientación con apariencia de una textura gnéisica, donde se deben utilizar criterios de campo que permitan diferenciar estos materiales (AMVA, 2016).

4.1.15 Stock de Las Estancias (KcdE)

Corresponde a cuerpos menores de granitoides que, aunque separados geográficamente del cuerpo principal del Batolito Antioqueño, presentan características litológicas, mineralógicas y texturales similares y una posición que hace suponer una relación genética con éste.

Este cuerpo aflora hacia la comuna nororiental, margen derecha de la quebrada La Castro, parte baja del Cerro Pan de Azúcar.

Perfil de Meteorización:

El perfil generalizo se describe (AMVA, 2016):

- Horizonte VI: Corresponde a un limo arenoso de color rojo, amarillo rojizo o amarillo. Espesor variable máximo de dos metros.

- Horizonte V: Material que conserva la estructura original. Puede desarrollar grus. Espesor aproximado de cinco metros.
- Horizonte IV: Roca altamente meteorizada con más del 50% del material desarrollando suelo residual. El espesor promedio es de diez metros.
- Horizonte II, II y I: Roca granítica que varía según el grado de fracturamiento que presente.

En los estudios de detalle (Polígono La Sierra, EAFIT 2017) se tienen las siguientes características del perfil de meteorización:

Se caracteriza por conformar principalmente suelos finogranulares de textura arenosa heterogéneos, predominantemente de colores grises– cremas, con la presencia de fragmentos de rocas residuales distribuidas erráticamente y de dimensiones muy pequeñas.

- El suelo residual (horizonte IB): tiene una profundidad máxima de 1 m, caracterizado por un material limo - arenoso, con tamaño de grano fino a medio, de color gris claro - ocre.
- Horizonte IC: este se encuentra compuesto por un material de color gris - crema. Tamaño de grano medio. Se observan algunas características mineralógicas y texturales del material parental (Stock). Se presentan fragmentos de roca no mayores a 5 cm en su diámetro. Tiene una variación del porcentaje de matriz del 90% a 95% de matriz y de fragmentos de roca entre el 5% y 10%% respectivamente. El espesor promedio de este horizonte puede ser superior a los 10 m, el cual se observa en afloramientos alrededor del polígono de Las Estancias, no se encontró roca fresca.

En los estudios de detalle (Polígono San Antonio, EAFIT 2017) se tienen las siguientes características del perfil de meteorización:

Se caracteriza por presentar una secuencia descrita desde el tope a la base conformada por un delgado horizonte orgánico cuyo espesor varía entre 0,15 y 0,60 metros, cuya textura varía entre limo-arenosa y limo arcilloso, de color negro a café oscuro. Infrayaciendo la capa orgánica se identifica un estrato de textura limo-arenosa de color café rojizo a café amarillento completamente meteorizado. Se identifican zonas de oxidación que imprimen coloraciones negras y cafés oscuras. En general el espesor de este material clasificado como suelo residual completamente meteorizado (nivel IB) oscila entre 3 y 5 m.

Debajo del suelo residual (nivel IB), aparece el saprolito o nivel IC, es decir, suelo con textura de la roca parental de color café rojizo moteado de negro y amarillo. El espesor de este estrato varía entre 6 y 7 m hasta la profundidad explorada. Este estrato de textura similar al anterior, es decir limo arenoso, difiere del anterior en el menor contenido de humedad y en la mayor consistencia.

Adicionalmente asociado a este estrato se identifica la presencia de algunos minerales altamente meteorizados y de zonas donde se destaca la presencia de fragmentos de rocas con un grado de meteorización menor, conservando aún la estructura de la roca original, pero con un alto estado de oxidación. Se identifican zonas de oxidación a través de las estructuras heredadas.

Contactos litológicos: El Stock de Las Estancias, es un cuerpo localizado entre los bloques sur y central de la Dunita de Medellín, en contacto fallado con esta unidad e intrusivo en anfibolitas, presenta una forma irregular con una extensión de 3,6 km^2, longitud mayor de dirección SW—NE de unos dos kilómetros y una amplitud NW—SE de 1,2 km. Aflora en la comuna nororiental por el sector del barrio San Antonio, sector de la quebrada La Castro.



Ilustración 15. Roca muy fracturada y diaclasada del Stock de Las Estancias

Fuente: Estudio de detalle Villa Turbay, (Universidad EAFIT, 2019)

4.1.16 Stock de Media Luna (KcdML)

Hacen parte de rocas derivadas del Batolito Antioqueño, son similares en composición, grado de meteorización entre otras. Se encuentra aflorando en la vereda Media Luna, sobre la vía principal que

de Santa Elena conduce a Medellín. Presenta una composición cuarzodiorítica de textura fanerítica media.

Perfil de Meteorización: En la zona de estudio se observó esta unidad solamente en horizonte V del perfil de meteorización (AMVA, 2016).

- Horizonte V: Es un suelo de color moteado blanco con tonalidades rojizas y amarillosas. El espesor visible es de unos siete metros**.**

Contactos litológicos: El contacto, con la Anfibolita de Medellín, se encuentra sepultado por un depósito de deslizamiento y por lo tanto este se puede observar mediante un cambio geomorfológico.

4.1.17 Batolito de Ovejas (KtO)

Litológicamente muestra variados tipos de roca, predominando las tonalitas y en menor proporción granodioritas, cuarzodioritas y en algunos casos dioritas y gabros con diques pegmatíticos (López, 1991). En muestra de mano, la roca es de color blanco, moteada de negro o gris oscuro, con apariencia masiva y textura granítica de grano medio a finogranular. Esta roca constituye el basamento de la planicie denominada Llano de Ovejas. En algunos afloramientos se observan gabarros o autolitos con forma de elipsoides alargados, y generalmente de composición básica, cuyo origen está asociado a las primeras etapas de cristalización del magma. Se encuentra aflorando en una pequeña parte en límites con el municipio de Bello.

Perfil de Meteorización: El suelo que se genera es bastante profundo, de color blanco. Generalmente afloran los horizontes V y VI. El horizonte V aún conserva rasgos de la roca parental, sin embargo, se pueden describir como material de color amarillo claro, areno limoso, consistencia firme, no plástico, húmedo y cementación moderada (AMVA, 2016).

- Horizonte V: Roca extremadamente meteorizada conservando la estructura original. Los bloques, en un porcentaje aproximadamente de 10 a 20% y de dimensiones métricas, se caracterizan por presentar meteorización esferoidal. Espesor aproximado de cinco metros.
- Horizonte IV: Suelo altamente meteorizada, color amarillo rojizo, textura arenosa limosa, de consistencia firme, baja plasticidad y cementación moderada. El espesor promedio es de diez metros.

Contactos litológicos: Se encuentra intruyendo las metamórficas de la cordillera Central como las anfibolitas, los esquistos anfibólicos y el gneis.

4.1.18 Stock de Altavista (KdA)

Aflora al occidente del río Aburrá en los corregimientos de San Cristóbal, San Sebastián de Palmitas y Altavista, al norte en límites con el municipio de Itagüí. Su composición es variable, con predominio de roca básica, va desde andesita hasta granodiorita, compuesta por hornblenda, plagioclasa y cuarzo. Muestra coloraciones variadas desde gris claro a gris oscuro, con tonalidades verdosas, varia texturalmente entre afanítica y finogranular. Se encuentra intensamente meteorizada, alcanzando espesores de meteorización hasta de 45 m, en algunos sitios se explota para la industria de la cerámica roja. Es común encontrar esta roca en afloramientos dispersos en el sector occidental del municipio. Algunos de los afloramientos más representativos se localizan hacia el sector del Boquerón, hacia la margen derecha de la quebrada La Sucia, en las veredas La Sucia, La Frisola, Volcana - Guayabal y el casco urbano de San Sebastián de Palmitas; en San Cristóbal y hacia las ladrilleras del corregimiento de Altavista en las quebradas Ana Díaz, La Picacha y La Guayabala.

Perfil de Meteorización: En el corregimiento de Altavista, en algunas canteras de las ladrilleras; desarrolla un suelo limo arcilloso, de colores rojizos y amarillentos, que incluyen bloques de roca parcialmente meteorizados. En general, el perfil de meteorización no desarrolla horizontes homogéneos, debido a las variaciones composicionales del cuerpo, que va desde diorítico hasta granítico. Cuando corresponde a una roca de tipo microdiorita, el perfil de meteorización es variable.

En sectores de pendientes moderadas (25 a 30º) cuando se presenta asociada con los esquistos, se desarrollan perfiles espesos que por lo regular presenta en contacto un horizonte V de la diorita con un horizonte tipo IV de los esquistos (AMVA, 2016).

- Horizonte VI: Textura ausente. Suelo limoso de color pardo claro no plástico. Espesor de dos metros. Suelo residual de textura limosa y color rojizo a pardo rojizo. Los espesores van hasta un metro.
- Horizonte V: Textura original presente y núcleos ausentes, material arcilloso de color pardo claro a pardo rojizo con motas negras, plástico con textura granítica, se conservan bien definidas las discontinuidades. Alcanza un espesor de ocho metros. Saprolito con textura limosa y color homogéneo amarillo pardusco. En algunos sectores se observa una coloración moteada entre gris claro y amarillo pardo. Alcanza hasta cinco metros de espesor y en zonas donde las pendientes son suaves alcanza hasta 10 m.
- Horizonte IV: Suelo y núcleos de roca presentes. Suelo limo arenoso de color blanco amarillento a rojizo, con motas oscuras, con fragmentos de roca muy meteorizada. El espesor es de unos cinco metros.
- *Horizonte I:* Presenta espesores de hasta 10 m, principalmente hacia la parte alta de la vertiente montañosa de la denominada cuchilla Baldías y el sector del cerro Padre Amaya.

En los estudios de detalle (Polígono El Salado (Circuito Corazón), EAFIT 2019) se tienen las siguientes características del perfil de meteorización:

- Suelo residual o nivel IB (Kda-IB): Este nivel no se observó en afloramiento, pero si en los sondeos realizados en la zona, está caracterizado por una textura predominante limo-arenosa y limo-arcillosa, con color crema y crema-amarillento. La roca se presenta totalmente meteorizada, fácilmente deleznable y no se observan estructuras de la roca original.
- Saprolito o nivel IC (Kda-IC): caracterizado por una textura predominante limoarenosa, con color crema, crema amarillento y rojizo, este último asociado a procesos de oxidación de minerales. En algunos casos se observan minerales negros a verdes dentro del material meteorizado asociado a minerales máficos y motas blancas relacionados a la meteorización de la plagioclasa. Los afloramientos en el polígono se observan principalmente en los taludes de las viviendas, pero no son de dimensiones muy representativas, y en su mayoría están cubiertos por los múltiples llenos realizados para la adecuación de la ladera para la construcción de vivienda. El material es fácilmente deleznable.
- Roca alterada II A (transición suelo roca): Este nivel no se observó a nivel de afloramiento, pero se reporta en las perforaciones. Este material se caracteriza por fragmentos de roca sana en una matriz de suelo limoso; los fragmentos presentan texturas variadas entre granodiorita, brechas y gabros, facies típicas del Stock de Altavista. Los fragmentos presentan una variación entre tonalidades gris claro con presencia de plagioclasa, hasta gris oscuro con tonalidades verdosas, en los planos de fracturamiento se observa vetas rojizas asociadas a procesos de oxidación de minerales.
- Roca sana III: La roca no alterada se identifica en los sondeos exploratorios y se caracteriza por una variedad de facies entre las que se identifican, gabros, brechas y diorita, con colores que oscilan entre gris claro, gris, gris oscuro y gris verdoso, textura variable entre afanítica y fanerítica de acuerdo con la facie; la roca se observa muy fracturada.

Estructuras:

- Diaclasas: N35°W/76°E - N23°W/84°W - N45°E/69°W - N58°W/56°W - S50°E/25°E - N40°W/55°SW - N67°W/45°N - N60°W/60°E - N18°E/V - N80°W/50°N - N80°W/60°E - N20°W/75°E - N5°W/V - N85°W/60°NE - N20°E/35°NW - S75°W/75°NW - N25°W/60°NE - N70°W/25°SW.
- Zona de falla (contacto con gneis): N75°E/45°NW.



Ilustración 16. Roca parcialmente meteorizada IIB, cauce de la quebrada La Iguaná

Fuente: Estudio de detalle Villa Turbay, (Universidad EAFIT, 2019)

4.1.19 Stock de San Diego (KgSD)

Corresponde a la unidad de cuerpos intrusivos cretáceos. Son rocas ígneas plutónicas básicas que varían composicionalmente, desde dioritas hasta gabros olivínicos. Presentan texturas desde fanerítica fina hasta pegmatítica. Mineralógicamente se observa feldespato cálcico y hornblenda, además de algún contenido ocasional de olivino. Como rasgo dominante esta unidad geológica exhibe un avanzado proceso de meteorización, favorecido por las condiciones climáticas y topográficas en las que se encuentra enmarcada. Es un cuerpo plutónico que aflora de manera escasa en el corregimiento de Santa Elena en el sector de El Mirador del Poblado y con desarrollo de suelos residuales, [que pueden alcanzar hasta 45m de espesor, en el área del Seminario Mayor. También aflora en el extremo noroccidental desprendiéndose desde la parte alta de las antenas de Telecom, constituyendo las vertientes de inclinación al sur. Incluyendo los sectores de El Mirador del Poblado, barrio La Asomadera, Altos del Poblado, Los Pisquines, el hotel Intercontinental, barrio Castropol y barrio El Guamal.

Perfil de Meteorización: Presenta un desarrollo importante del perfil de meteorización, alcanzando hasta 45m de espesor. El suelo residual del perfil, primeros cinco metros aproximadamente,

corresponde a limos de tonalidades claras (amarillo y blanco con manchas pardas), variando a profundidad a espesos horizontes saprolíticos (principalmente horizonte V con espesores superiores a 25 m) de carácter limo arenoso y colores abigarrados. El horizonte V se encuentra suprayaciendo los horizontes I y II del perfil de meteorización (AMVA, 2016).

- Horizonte VI: Suelo limoso de color amarillo parduzco pardo claro no plástico. Espesor de hasta cinco metros.
- Horizonte V: Textura original presente y núcleos ausentes. Material limo-arenoso de color abigarrado: blanco, rojo, amarillo con motas oscuras. Textura granítica. Los espesores pueden superar los 30 m.
- Horizontes II y I: Roca fresca de textura granítica.

En los estudios de detalle (Polígono Candamo, EAFIT 2022) se tienen las siguientes características del perfil de meteorización:

- Suelo residual – Nivel IA (KgSD-sr): Tiene un espesor variable entre 3 y 9 metros y se caracteriza por un color amarillo crema a rojizo oxidado con pintas negras, con textura limo - arcillosa y sin evidencias de la roca original. Este material se encuentra principalmente en las perforaciones realizadas, del sector Candamo, localizadas a media ladera y en la parte baja del polígono, limite oeste, respectivamente.
- Saprolito – nivel IC (KgSD-s): Se caracteriza por un color blanco con gris a gris verdoso con pintas blancas y negras, además de oxidaciones parciales. La textura es arena fina, generalmente deleznable y se conservan algunos bloquecitos de roca que representan una roca maciza. Este nivel alcanza14 metros de espesor hasta la profundidad explorada.

Contacto Litológico: Esta unidad se encuentra intruyendo a la unidad de Migmatitas de Puente Peláez, a la altura del restaurante Asia, en el sector de discoteca La Isla y en el sector de Loreto aflora en forma de techos colgados de forma irregular, los cuales se encuentran distribuidos caóticamente. El contacto con la Dunita de Medellín puede observarse en el sector de la colegiatura, vía Las Palmas, y al norte de Monticello.

El patrón de afloramientos de este plutón es bastante irregular debido a la relación intrusiva que exhibe con las unidades adyacentes. Es así, como en varios tramos de la carretera a Las Palmas se observan paquetes de rocas metamórficas del tipo gneis anfibólico como techos colgados, con contactos irregulares e interdigitados. Estos techos conforman zonas de topografía algo más empinada, como las ubicadas en el sector la discoteca La Isla y en el cauce de la quebrada Yerbabuena con Las Palmas. Como ya se había descrito este stock presenta una relación intrusiva con las Dunitas de Medellín. Es importante aclarar que la zona de falla sub-horizontal que existe entre

dunitas y anfibolitas o gneis anfibólico es asimilada por el cuerpo gabróico o metagabro, implicando para éste una edad más reciente con respecto a la obducción de las dunitas.



Ilustración 17. Afloramiento localizado en talud de vivienda por escalera principal que baja desde la calle 32 al barrio Candamo

Fuente: Estudio de detalle Candamo, (Universidad EAFIT, 2017)

4.1.20 Depósitos de vertiente (Qd, QFa, QFIV, QFiii, NQFII, NFl y NFprel)

Existe una gran variedad de depósitos de vertiente que cubren las laderas del Distrito de Medellín, cuyos materiales dependen principalmente de las unidades geológicas que afloran en la parte alta de las vertientes.

Depósitos de deslizamiento: Dentro de los depósitos de deslizamiento, en el corregimiento de Santa Elena se localiza en el km 10+700 de la vía a Santa Elena un depósito de dimensiones considerables, caracterizado por tener muy mala selección, bloques con diámetro que no superan 50 cm, matriz arcillosa y relación granos matriz 40:50. En el corregimiento de San Sebastián de Palmitas, los depósitos que predominan corresponden a depósitos de vertiente, relacionados geomorfológicamente a pequeños peldaños en medio de la vertiente montañosa. Están constituidos por material fino del perfil de meteorización, mezclado con bloques de roca de forma angular a subangular. En estos sectores de acumulación es común encontrar varios niveles de depósitos de deslizamientos, tal como se puede apreciar en el corte sobre la antigua vía a Santa Fe de Antioquia, cerca de la quebrada La Cascada. En esta zona se observa un depósito de unos dos metros de espesor con un 30º% de bloques, ligeramente meteorizados, embebidos en una matriz limo arenosa de color amarillo pardo. Esta capa suprayace otra capa de 1,5 m de espesor de un flujo de lodos con un 10 % de bloques, ligeramente meteorizados, compuestos de diorita en una matriz limo arenosa color amarillo pardusco. En el corte sobre la vía de la Conexión Vial Aburrá - Cauca, son frecuentes los depósitos de deslizamiento, localizados hacia la parte baja de la vertiente montañosa. Estos

depósitos presentan espesores que alcanzan hasta 10m; compuestos principalmente de bloques de roca entre un 60 y un 90 %, angulares a subangulares, de diámetros variables entre cinco centímetros y un metro (AMVA, 2016).



Ilustración 18. Depósito de deslizamiento sobre la vía a Aguas Frías, se observa un sector del escarpe del deslizamiento

Fuente: Estudio de detalle quebrada La Picacha, (Universidad EAFIT, 2019)

Depósitos de flujo: Aparecen dispersos sobre grandes extensiones en el Valle de Aburrá, reposando concordantemente sobre el basamento ígneo - metamórfico y sobre depósitos más antiguos o intercalados con ellos. Constituidos por bloques heterométricos, con un grado de meteorización de moderado a alto. Con matriz arcillo limosa o limo-arcillosa, en colores claros como pardo, gris y amarillo. Su génesis se encuentra asociada a la desestabilización de la vertiente afectadas por el fracturamiento múltiple sobre estas rocas, además de eventos sísmicos y alta pluviosidad, factores que ayudaron a movilizar los niveles saprolíticos de las rocas hacia la parte inferior de las vertientes. Particularmente, en el corregimiento de Santa Elena, los depósitos de flujos de escombros y lodos son escasos, encontrándose en la vereda El Plan el flujo más representativo de este tipo de depósitos. Corresponde a bloques mal seleccionados, de diámetro máximo de un metro, conformados por anfibolita, subangulosos a subredondeados en una matriz de granulometría variable entre arena, arcilla y limo, en coloraciones pardo amarillento (AMVA, 2016).

En los estudios de detalle (Polígono Caracolí, EAFIT 2017) se tienen las siguientes características:

Por medio de los sondeos exploratorios se definen dos facies de estos depósitos, una facies principalmente de flujo de lodos donde predomina la matriz de textura arcillosa, el color es amarillo - naranja y embebe bloques centimétricos de color gris con pintas blancas; estos bloques son de tamaño formas subangulares; el espesor es de 4 m y está por encima de un depósito donde hay mayor

contenido de bloques, y cuya matriz es arcillosa, color variable entre café oscuro y verde con oxidaciones. Los bloques tienen diferentes grados de meteorización, de forma subredondeada - subangulosa, y composición variable (roca plutónica fanerítica, de color blanco con pintas negro; roca negra con bandas de minerales blancos, ligeramente orientada). El espesor de esta facies puede alcanzar hasta 11 m.

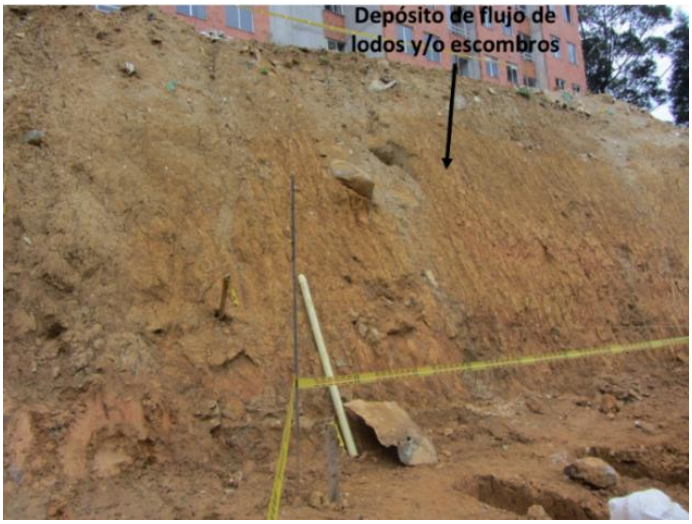


Ilustración 19. Depósitos de vertiente - Flujo de lodos y/o escombros en la urbanización Avellanas
Fuente: Estudio de detalle Caracolí, (Universidad EAFIT, 2017).

En los estudios de detalle (Polígono Juan Pablo II, EAFIT 2022) se tienen las siguientes características:

Los depósitos se encuentran sobre el sector norte, especialmente caracterizados por estar en zonas con pendiente moderada del área de estudio y las cuales han sido totalmente intervenidas de manera antrópica.

Son depósitos mal seleccionados, que se encuentran conformados por fragmentos de roca anfibolítica (30%), principalmente, angulares a subangulares, de hasta 2 m de diámetro, con matriz (70%) compuesta por limos y arenas de color café claro a oscuro. Se encuentran moderadamente meteorizados y tienen una profundidad de hasta 15 m.

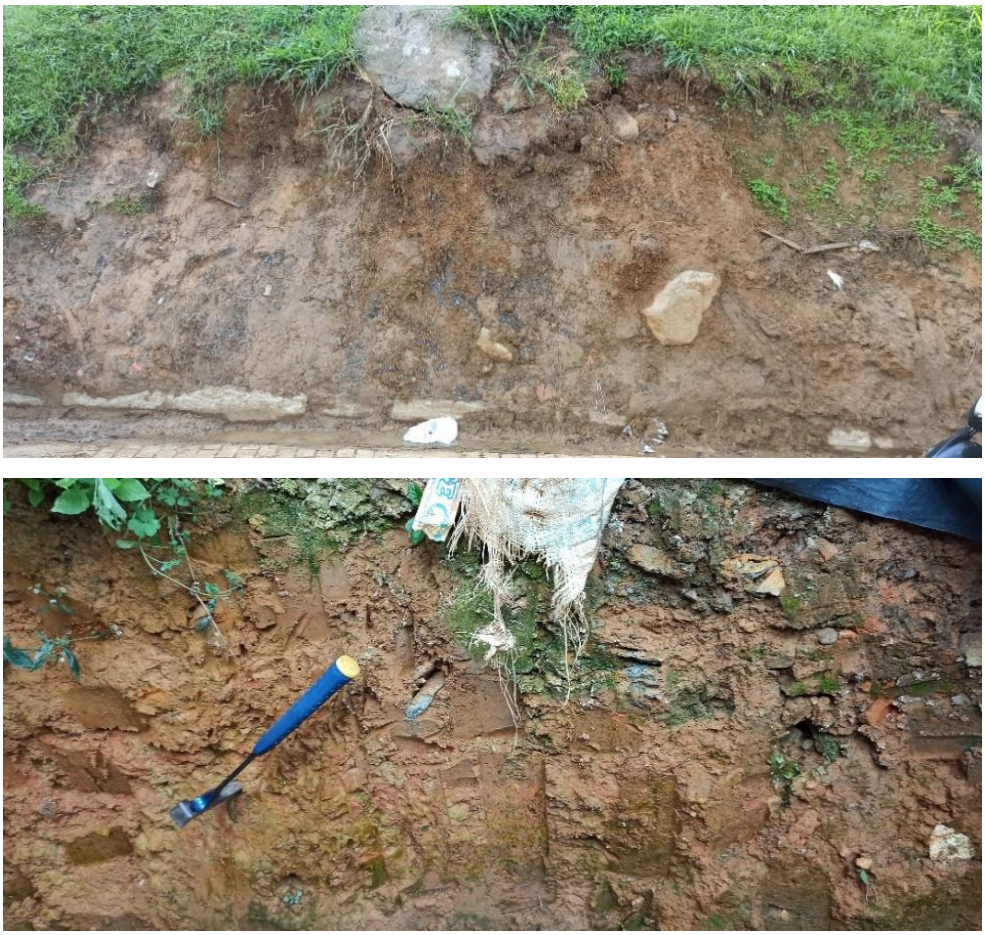


Ilustración 20. Afloramiento del depósito de flujo de lodos y escombros
Fuente: Estudio de detalle Juan Pablo II, (Universidad EAFIT, 2022)

En los estudios de detalle (Polígono Aures, EAFIT 2019) se tienen las siguientes características:

Depósitos de flujos de lodos y escombros (NQFle): Está caracterizando por ser depósitos mal seleccionados, conformados principalmente por una matriz limo – arenosa de color café amarillento, con fragmentos de roca subredondeadas a subangulares, de tamaños variable y moderadamente meteorizados, predominando la fracción fina sobre la gruesa (matriz soportada).

Depósitos de flujo de lodos (NQFl): Está caracterizando por depósitos conformados principalmente por material de textura limo – arcillosa, plástico, de color café amarillento, se observan muy pocos fragmentos de roca y de tamaños inferiores a los 2 centímetros. Estos depósitos se encuentran reposando sobre los flujos de lodos y escombros sobre la zona central y oriental del polígono más occidental (Malpaso).



(a) (b)

Ilustración 21. Depósitos de flujo de lodos y escombros, sector de la quebrada La Batea (a), flujo de lodos y escombros sobre vertiente izquierda de la quebrada Malpaso (b)

Fuente: Estudio de detalle Aures, (Universidad EAFIT, 2019)

4.1.21 Depósitos Aluviales (Qal, Qat)

Corresponden a los depósitos del fondo del valle generados por el río Aburrá y algunos de sus afluentes. Se distribuyen en una franja irregular que sigue el río, aumentando su extensión hacia el flanco occidental del valle, alcanzando longitudes de hasta siete kilómetros. Los más pequeños se limitan a los cauces y pequeñas riveras de las quebradas de menor jerarquía.

Depósitos aluviales: Estos depósitos están constituidos por diversos materiales, que incluyen arcillas, limos, arenas, gravas gruesas y fragmentos rocosos heterogéneos composicionalmente estratificados con continuidad horizontal variable, formando abanicos, terrazas y llanuras aluviales. Los paquetes de gravas contienen fragmentos redondeados y subesféricos de cuarzo, diorita, gneis, anfibolita, esquisto, basaltos, dunitas, pórfidos andesíticos y cuarzodioritas, entre otros.

En el sector de El Poblado los terrenos aluviales involucran la zona industrial, Monterrey, barrio Patio Bonito, El Remanso, el INEM, el Politécnico, universidad EAFIT, Bosques de La Aguacatala y Villa Jardín. Dichos terrenos están constituidos por diversos materiales, que incluyen arcillas, limos, arenas y gravas gruesas en paquetes de disposición y continuidad horizontal variable; aunque en general la gradación de dichos materiales es normal, pasando superficialmente de los más finos (limos-arcillosos y limos-arenosos) a los paquetes de granulometría gruesa.



Ilustración 22. Depósitos de cauce aluvial de la quebrada La Picacha
Fuente: Estudio de detalle quebrada La Picacha, (Universidad EAFIT, 2019)

Depósitos aluviotorrenciales: Corresponden a los depósitos formados en los valles de las quebradas con forma alargada y de abanicos, ocupando partes medias de las vertientes y en las partes bajas las zonas de baja pendiente. Estas unidades son el producto de eventos erosivos ocurridos en épocas y periodos de alta pluviosidad que han generado avenidas torrenciales de diferente magnitud, depositando materiales con una gran diversidad en litología, tamaño, forma y espesores. Se caracterizan por una depositación sin estratificación 0 selección en los materiales transportados. La forma varia desde clastos subredondeados a redondeados, tamaños desde métricos, embebidos en una matriz areno gravosa, de color gris, consistencia dura, no plástica. Por lo general las partes bajas están más húmedas y secas en las partes altas. Debido a su alta permeabilidad, exhiben un grado de meteorización moderado, actualmente son disectados por las corrientes actuales.

En el corregimiento de San Sebastián de Palmitas, las características geomorfológicas permiten inferir una dinámica aluvial fuerte, donde los depósitos aluviotorrenciales se encuentran asociados a las redes de drenaje de orden mayor.

Es decir, estos depósitos son comunes hacia la parte baja de las cuencas de las quebradas, debido a las características morfológicas de valles en "V" estrechos y encajados, y de gradiente alto. Se caracterizan por presentar un alto contenido de bloques de roca, más del 90%, subredondeados, de variada composición, en matriz arenosa. Los depósitos están asociados a material de deslizamientos grandes o procesos erosivos por carcavamiento, los cuales se concentran por las redes de drenaje.

Depósitos de este tipo se presentan también en el corregimiento de San Cristóbal en la quebrada La Peña, tanto en su sector intermedio como en inmediaciones de su desembocadura a quebrada La Iguaná.



Ilustración 23. Depósitos aluviotorrenciales sobre la quebrada La Iguaná.

Fuente: Estudio de detalle Boquerón, (Universidad EAFIT, 2021).

En los estudios de detalle (Polígono Boquerón, EAFIT 2021) se tienen las siguientes características:

Estos depósitos corresponden a la acumulación de materiales transportados por las corrientes, en diversas proporciones y tamaños, producto de las crecientes súbitas y dispuestos en las márgenes de los cauces. En el sector de estudio de la quebrada La Seca y La Iguaná, se caracterizan por presentar una distribución puntual a lo largo del cauce, con una mayor predominancia y extensión (entre 40 y 100 m respectivamente) hacia la margen izquierda de ambas quebradas, los depósitos se encuentran después del cruce de la quebrada La Seca y la vía principal, y aguas debajo de la desembocadura de La Seca en La Iguaná. Estos depósitos están compuestos por bloques mal seleccionados subangulosos a subredondeados de tamaños métricos inferiores a los 5 m de diámetro, con alturas variables entre 50 cm y 1,5 m. La matriz presenta una composición areno-limosa y una coloración marrón clara. Estos depósitos se encuentran intercalados con materiales asociados a depósitos de vertiente, sobre los cuáles discurre el cauce en ciertos tramos y cuyos bloques conforman prominencias en las márgenes del cauce entre las construcciones asentadas en sector.

De igual manera es importante resaltar que la alternancia de estos depósitos aluviotorrenciales con depósitos de vertiente sugiere un retrabajamiento importante de estos materiales, por lo cual no es posible identificar de manera clara el área fuente de estos. De igual manera, los bloques exhiben procesos de meteorización leves a moderados.

4.1.22 Depósitos antrópicos - Llenos (Qll)

El desarrollo de la actividad urbanística y constructiva, propia de ciudades en crecimiento, genera gran cantidad de escombros y materiales de rezaga; los cuales deben ser dispuestos en otros lugares, desarrollándose acumulaciones artificiales que pueden llegar a tener una extensión y espesor. En el Distrito de Medellín, principalmente hacia las zonas urbanas, es común observar llenos antrópicos

(algunos no cartografiables), sobre los cuales comúnmente se han construido viviendas y parques deportivos, entre otros. La composición de estos depósitos es en extremo heterogénea, desde materiales homogéneos conformados con algunas normas técnicas hasta basura, materia orgánica y escombros simplemente dispuestos, con propiedades geotécnicas pobres para cortes y capacidad portante.

Otro tipo de llenos antrópicos que abarcan áreas mayores corresponden a los "Botaderos" que se generaron por ejemplo como producto de la apertura de la vía Aburrá — Cauca. Algunos de ellos pueden observarse en el sector sur de la vereda La Aldea, donde hay un lleno que abarca un área de más de 100 m2. Estos llenos, está compuesto por bloques angulosos a subangulosos de roca fresca y diámetros muy variables que alcanzan hasta los dos metros. La relación aparente de bloques / matriz es 50/50, la matriz es arenosa con una fracción alta de finos. También pueden ser denominados escombreras (AMVA, 2016).



Ilustración 24. Llenos antrópicos

Fuente: Estudio de detalle Brisas del Jardín, (Universidad EAFIT, 2016).

4.2 ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS

El Distrito de Medellín presenta al menos tres grupos de estructuras tectónicas principales, las relacionadas con la obducción de una secuencia ofiolítica; las de tendencias N-S y las de tendencia N-W (AMVA, 2007).

Las estructuras tectónicas de obducción o cabalgamiento están relacionadas a un extenso cuerpo dunítico que cruza el sector Oriental de la ciudad con dirección general N-NE; el cual corresponde a una antigua escama de material ultrabásico oceánico, emplazado tectónicamente por un complejo

proceso de obducción durante el Cretáceo Inferior (102 m.a., aproximadamente) sobre las anfibolitas (Restrepo, 1986). Asociadas a este fenómeno se desarrollaron una serie de estructuras tectónicas que marcan el contacto aproximadamente sub-horizontal entre las dunitas y las anfibolitas (AMVA, 2007).

A continuación, se describen las características de las fallas reportadas en el Distrito (ver Ilustración 25).

- Falla La Acuarela

De acuerdo con Ingeominas (2005 en AMVA, 2007), con este nombre se denomina una falla de rumbo de dirección N-S a NNW que se une a las trazas de falla del Sistema Belmira. Localmente esta falla se bifurca en dos trazas que limitan al Gneis Milonítico de Sajonia y lo ponen en contacto al occidente con la Dunita de Medellín y las Anfibolitas de Medellín, y al oriente con las Anfibolitas de Medellín. Esta falla, se diferencia de la falla de cabalgamiento de Rodas y por cuestiones de sinonimia con la Falla Otú – Pericos se considera más adecuado darle una denominación diferente (AMVA, 2007).

- Falla de Rodas

De dirección general NS/45°NS/45°E, pone en contacto las Dunitas de Medellín con las Anfibolitas. Con buzamiento 45°NE y se ha determinado de carácter normal. No presenta evidencias de desplazamientos horizontales y con desplazamiento vertical desconocido (AMVA, 2007).

- Falla Santa Elena

Documentada por Sierra y Zapata, 1989, como lineamiento Buenos Aires, y asociado a la Falla Santa Elena. Evidenciado por cambios notables de pendiente y facetas triangulares, hacia la parte baja del cerro El Gallo sobre el cauce de la quebrada El Viento, presenta una zona de unos seis metros de material cizallado y dirección EW a N80°NS/45°E y buzamiento subvertical (AMVA, 2007).

- Falla de Iguaná – Boquerón

Esta falla presenta dirección N80°W – N20°W (AMVA, 2007). A lo largo del Distrito no se observan controles geomorfológicos e hídricos asociados al trazo de esta falla. Adicionalmente, se encuentran lineamientos con tendencia SW-NE y NW – SE.

- Falla San Jerónimo

Esta falla presenta dirección NNW, prolongándose hacia las vertientes del río Cauca al NW del cerro del Padre Amaya. Presenta zonas de cizalla al oeste de San Antonio de Prado y en la vía a Heliconia. En su zona de influencia, los contactos de las rocas son en general fallados y con buzamientos que varían entre 60 SW y 80 NE con tendencia vertical. Constituye la falla más oriental del sistema de Falla de Romeral. La expresión más notoria de esta falla es un prominente quiebre recto en la pendiente en la parte oeste del Valle de Aburrá. El Estudio de Microzonificación sísmica de 1999 describe la falla San Jerónimo como una falla de rumbo sin que hayan identificado evidencias de actividad cuaternaria en los sitios estudiados y le asignan un grado de actividad de bajo a moderado.

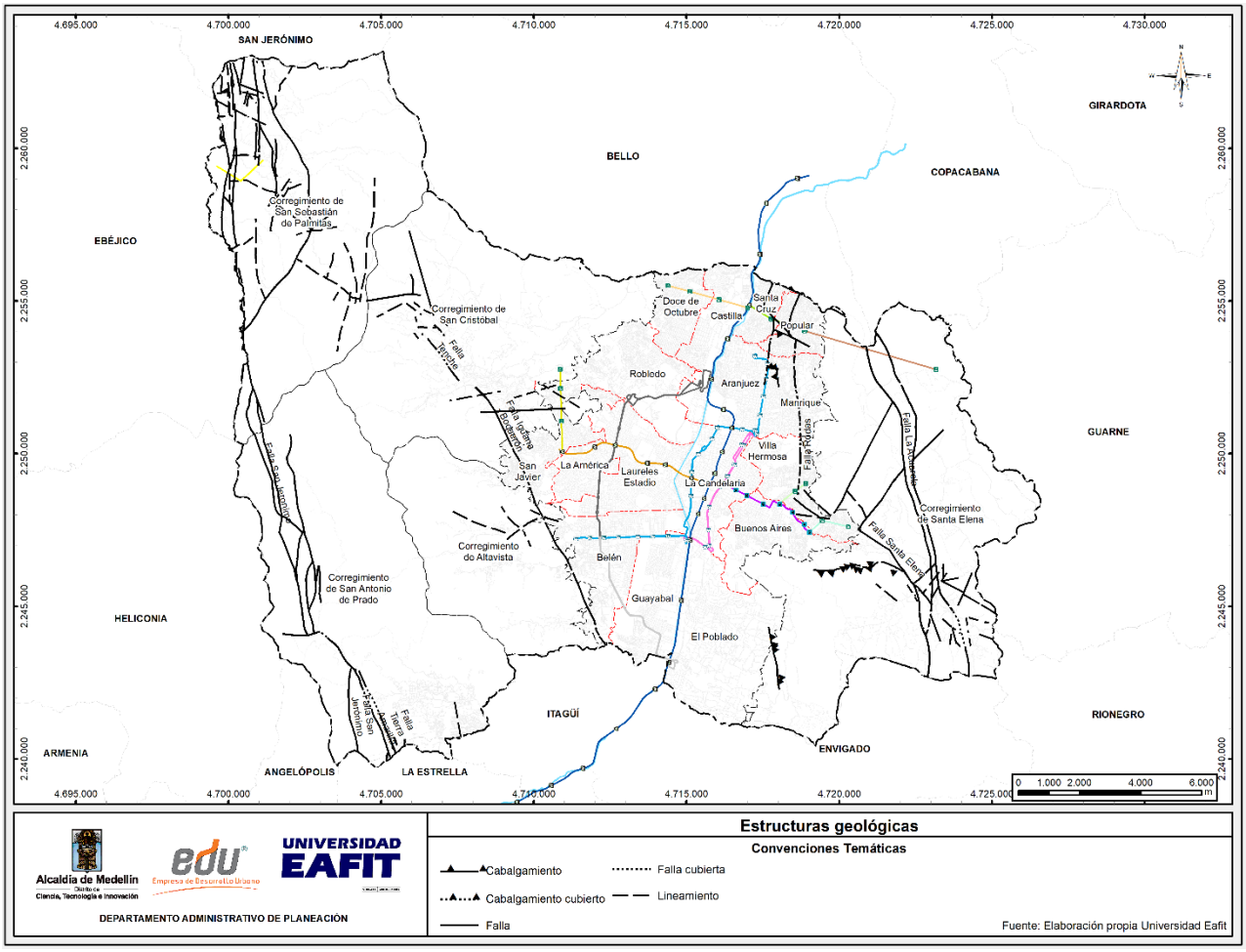


Ilustración 25 Estructuras geológicas en el distrito de Medellín

Fuente: Adaptado de AMVA (2007)

4.3 GEOMORFOLOGÍA LOCAL

El Distrito de Medellín, se ubica en la zona más septentrional de la cordillera Central, asociada directamente al valle del río Medellín - Porce. La Caracterización geomorfológica que se presenta a continuación, se retoma del estudio Microzonificación sísmica del Valle de aburra (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2007), y fue realizada de acuerdo con la siguiente jerarquización.

- Unidad fisiográfica: el distrito de Medellín se Ubica en la unidad fisiográfica Cordillera Central
- Unidades de relieve: Corresponde a la zona Norte de la Cordillera Central caracterizada por Altiplanos y cañones (Valle de Aburrá y cañón del río Cauca).
- Unidades de paisaje: el distrito está enmarcado en tres niveles de altiplanos, escarpes erosivos regionales entre dichos altiplanos y tres segmentos de valle (valles de Aburrá superior, medio e inferior). El cañón del cauca no se subdividió en unidades de paisaje por la falta de contexto geomorfológico, en la Tabla 2 se realiza una breve descripción general de cada una de ellas.
- Macrounidades geomorfológicas: al interior de los segmentos de Valle se cartografiaron Bloques. No se diferenciaron macrounidades en las unidades de paisaje de altiplanos y escarpes ni en el cañón del río Cauca por la escasa extensión dentro de la jurisdicción administrativa del Área Metropolitana.
- Unidades geomorfológicas: Se proponen unidades denominadas: lomerío, lomos, superficies suaves en depósitos moderadamente incisadas, peldaños, picachos, superficies con baja incisión, entre otras.

Tabla 2. Unidades de relieve y paisaje

Unidad de Relieve	Unidad de paisaje	Descripción
Altiplanos	**Superficie de erosión Pre-S-I**	Es la más antigua, alta y erosionada, con alturas que oscilan entre los 2800 y 3100 msnm representada por la serranía de Las Baldías y Cerro del Padre Amaya al occidente.
	Escarpe regional ER-1	Escarpe que marca el límite entre Pre S I y S I; caracterizado por vertientes erosivas, con desarrollo de escarpes semicirculares y lomos altos. Se identifica en las veredas El Plan, corregimiento de Santa Elena y remanentes hacia la serranía de Baldías.
	Superficie de erosión S-I	Superficie con alturas entre los 2500 y 2600 msnm; caracterizado por zonas muy suaves de baja incisión. Tiene su expresión al oriente de Medellín, hacia la vereda El Plan del corregimiento de Santa Elena.

Unidad de Relieve	Unidad de paisaje	Descripción
	Escarpe regional 2	Escarpe que marca el límite entre SI y SII. Este se presenta de forma discontinua como sistemas dendríticos de lomos bajos, con avanzado grado de incisión. Se observa al oriente de la vereda El Plan del corregimiento de Santa Elena.
	Superficie de erosión S-II	Es la superficie mejor conservada, con alturas cercanas a los 2200 msnm. Son remanentes de baja extensión y caracterizada por sistemas de lomos y superficies de baja incisión y lomeríos bajos cercanos a las vertientes superiores de la cuenca del río Aburrá.
Cañón del río Aburrá	**Valle de Aburrá superior**	Este valle es estrecho con una forma de "V" asimétrica; está comprendido entre el nacimiento del río Medellín hasta una línea imaginaria compuesta por la divisoria izquierda de la cuenca de la quebrada Doña María, hasta la cabecera de la quebrada Ayurá, usando el curso de agua como divisoria.
	Valle de Aburrá medio	Se extiende desde los municipios de Itagüí - Envigado hasta el municipio de Bello. Es el valle más ancho, con un fondo amplio y plano, flanqueado por superficies suaves en distintos depósitos de vertiente, sistemas de colinas y lomos que terminan en la parte más alta en escarpes lineales que marcan el límite del valle y los altiplanos
	Valle de Aburrá inferior	Se extiende desde los límites entre Bello y Copacabana hasta el municipio de Barbosa, es marcadamente más estrecho simétrico y de flancos muy paralelos indicado por su patrón de drenaje. Tiene abundantes depósitos de vertiente, especialmente en inmediaciones de los cascos urbanos mencionados, y una llanura aluvial de amplitud moderada.
Cañón del río Cauca	**Cuenca del Cauca**	Corresponde a una pequeña porción de la vertiente oriental del cañón del Cauca. Predominan las laderas de pendientes muy fuertes a escarpadas, asociadas a las cabeceras de las quebradas La Chuscala, La Potrera y La Frisola. Hacia la parte baja (vereda La Aldea) la morfología presenta un fuerte control estructural, con presencia de picachos, peldaños y otros rasgos morfotectónicos; asociados al sistema Romeral.

Fuente: (AMVA, 2007)

En la Tabla 3, se presenta (resalta) el contexto geomorfológico del Distrito de Medellín dentro de la jerarquización geomorfológica del Valle de Aburrá, teniendo en cuenta las unidades fisiográficas, unidades de paisaje, macrounidades y unidades geomorfológicas.

Tabla 3.Clasificación geomorfológica del distrito de Medellín en la jerarquización geomorfológica del Valle de Aburrá

Unidad Fisiográfica	**Cordillera Central**								
Unidad de relieve	**Norte de la Cordillera Central**								
	Altiplanos					**Cañón del río Aburrá**			**Cañón del rio Cauca**
Unidad de paisaje	**Superficie de erosión Pre-S-I**	**Escarpe regional 1**	**Superficie de erosión S-I**	**Escarpe regional 2**	**Superficie de erosión S-II**	**Valle de Aburrá superior**	**Valle de Aburrá medio**	**Valle de Aburrá inferior**	**Cuenca del Cauca**
Macrounidad						Bloque Doña María	Bloque Comuna Nororiental Alta	Bloque Copacabana - Girardota	Bloque San Sebastián de Palmitas
						Bloque La Estrella - San Antonio de Prado	Bloque Comuna Nororiental Baja	Bloque Hatillo - Barbosa	
						Bloque Quebrada La Candela	Bloque El Salvador	Bloque Matasanos	
						Bloque Romeral	Bloque Iguaná Superior	Fondo de Valle	
						Fondo de Valle	Bloque Itagüí - San Cristóbal		
						Bloque Alto de Minas	Bloque Poblado - Envigado		
						Bloque Cabecera Río Amagá	Bloque Robledo - Pedregal		
						Bloque Kachotis	Bloque Santa Elena		
						Bloque La Corrala	Fondo de Valle		
						Bloque La Culebra	Bloque Quebrada Rodas		
						Bloque Monteredondo	Bloque Bello Occidental		
						Bloque Oriental	Bloque Quitasol		
						Bloque Tablaza - Pueblo Viejo			
						Bloque Valeria Alta			
Unidad Geomorfológica	Depósitos sin incisión, lomos altos, lomos bajos, lomerío, rasgos morfotectónicos, superficie con baja incisión					Abanico, colinas aisladas, colinas en depósitos de vertiente, colinas en suelo residual, escarpe lineal superior, escarpe semicircular superior, geoforma antrópica, lomos, lomos bajos, llanura aluvial, picacho, peldaño, rasgos morfotectónicos, superficie con baja incisión, superficies suaves y moderadas en depósitos con diferentes grado de incisión, terrazas aluviales, vaguadas y cañones, vertiente en suelo residual con diferente grado de incisión			Lomos, escarpes semicirculares superiores, picacho, rasgos morfotectónicos, vertientes en suelo residual poco incisados

Fuente: AMVA, 2007.

El Distrito de Medellín se enmarca en tres unidades de relieve: Altiplanos o superficies de erosión, Cañón y cuenca del río Cauca; la mayor expresión geomorfológica la tiene en la unidad de relieve Cañón del río Aburrá (Tabla 2).

Las unidades de paisaje Valle de Aburrá Superior y Valle del río Aburrá Medio, se subdividieron en macrounidades geomorfológicas denominadas Bloques y estos a su vez en unidades geomorfológicas (Tabla 4). Los bloques son conjuntos donde se pueden detallar unidades geomorfológicas o conjuntos de geoformas vinculados genéticamente, o sea muestran condiciones morfológicas aproximadamente homogéneas que se distinguen de forma clara.

Las unidades de paisaje definidas como superficies de erosión, escarpes regionales y la unidad de relieve cuenca del Cauca, no se subdividieron en macrounidades, por la dificultad de enmarcarlas en el contexto geomorfológico (AMVA, 2007).

Tabla 4. Unidades geomorfológicas del Distrito de Medellín

Unidad de relieve	Unidad de Paisaje	Macrounidad	Unidad geomorfológica
Altiplano	**Escarpe regional 1**		Lomos bajos
	Escarpe regional 2		Lomos bajos
	Superficie de erosión I		Superficie con baja incisión
	Superficie de erosión I		Lomerío
			Superficie con baja incisión
	Superficie de erosión Pre-SI		Superficie con baja incisión
Cañón	**Valle Medio**	Bloque Comuna Nororiental	Lomos
			Peldaño
			Picacho
			Rasgos morfotectónicos
			Superficies suaves en depósitos moderadamente incisados
			Superficies suaves en depósitos poco incisados
			Vertientes en suelos residuales moderadamente incisados
		Bloque El Salvador	Lomos
			Picacho
			Superficies suaves en depósitos poco incisados
			Vertientes en suelos residuales poco incisados
		Bloque Iguaná superior	Escarpe lineal superior
			Lomos
			Rasgos morfotectónicos
			Superficie con baja incisión
			Superficies suaves en depósitos moderadamente incisados
			Superficies suaves en depósitos poco incisados
			Vertientes en suelos residuales moderadamente incisados
		Bloque Itagüí San Cristóbal	Colinas en suelos residuales
			Escarpes semicirculares superiores
			Lomos
			Superficies suaves en depósitos altamente incisados
			Superficies suaves en depósitos moderadamente incisados
			Superficies suaves en depósitos poco incisados
		Bloque Poblado Envigado	Colinas en depósitos de vertientes
			Colinas en suelos residuales

Unidad de relieve	Unidad de Paisaje	Macrounidad	Unidad geomorfológica
			Escarpe lineal superior
			Lomos
			Peldaño
			Superficies suaves en depósitos altamente incisados
			Superficies suaves en depósitos moderadamente incisados
			Superficies suaves en depósitos poco incisados
		Bloque Robledo Pedregal	Lomos
			Peldaño
			Picacho
			Superficies moderadas en depósitos con moderada incisión
			Superficies suaves en depósitos moderadamente incisados
			Vertientes en suelos residuales moderadamente incisados
		Bloque Santa Elena	Escarpes semicirculares superiores
			Lomos
			Peldaño
			Superficies suaves en depósitos moderadamente incisados
			Superficies suaves en depósitos poco incisados
		Fondo de Valle	Colina aislada
			Geoforma antrópica
			Llanura aluvial
			Superficies suaves en depósitos poco incisados
	Valle Superior	Bloque Doña María	Colinas en suelos residuales
			Lomos
			Superficies suaves en depósitos moderadamente incisados
		Bloque La Candela	Superficies suaves en depósitos altamente incisados
		Bloque La Estrella San Antonio	Superficies suaves en depósitos altamente incisados
			Superficies suaves en depósitos moderadamente incisados
			Vertientes en suelos residuales moderadamente incisados
		Bloque Romeral	Colinas en suelos residuales
			Lomos
			Rasgos morfotectónicos
		Fondo de Valle	Llanura aluvial
Cuenca Río Cauca			Escarpes semicirculares superiores

Unidad de relieve	Unidad de Paisaje	Macrounidad	Unidad geomorfológica
		Bloque San Sebastián de Palmitas	Lomos
			Peldaño
			Picacho
			Rasgos morfotectónicos
			Vertientes en suelos residuales poco incisados

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

4.3.1 Macrounidades geomorfológicas

En el distrito de Medellín se identifican 5 macrounidades en la unidad de paisaje Valle de Aburrá superior; 8 en la macrounidad Valle de Aburra Medio y 1 en la cuenca del Cauca.

4.3.1.1 Valle de Aburrá Superior (VS).

Esta macrounidad está representada por 5 bloques que se describen brevemente a continuación.

- **Bloque La Estrella – San Antonio de Prado (VS-BESP).** Ubicada en las partes media y baja de la vertiente occidental del Valle de Aburrá, hacia el corregimiento de San Antonio de Prado. Caracterizada por laderas largas, homogéneas, levemente cóncavas y pendientes predominantes son suaves a localmente empinadas. Geológicamente asociado a depósitos de vertiente y ventanas erosivas del complejo Quebradagrande (AMVA, 2007).
- **Bloque Doña María (VS-BDM).** Es una franja de terreno alargada en sentido SSE-NNW y que corresponde con la ladera izquierda de la quebrada Doña María. Geológicamente relacionada a rocas del Stock de Altavista y esquistos. Desarrolla unidades de lomos de diversa altura, en general de topes estrechos y redondeados con vaguadas profundas y bien definidas cuya orientación es concordante con la dirección del drenaje principal de la cuenca (AMVA, 2007).
- **Bloque Romeral (VS-BR).** corresponde a una franja alargada en sentido SSE-NNW, iniciando al sur en la parte alta de la cuenca de la quebrada La Culebra, extendiéndose al oeste hasta la Cuchilla del Romeral; al oriente sus límites corresponden a la parte alta de depósitos de vertiente y con el cauce de la quebrada Doña María en su tramo norte. Al norte el límite de nuevo es la divisoria de aguas con la cuenca del Cauca (AMVA, 2007).

Geológicamente está representada por franjas estructuralmente controladas de gabros, dioritas, dunitas, rocas volcánicas y volcano-sedimentarias; geomorfológica presenta el desarrollo de lomos regionales de tendencia general W-E y deflexión estructural, de tope estrecho, agudo y frecuentemente escalonado; los flancos son laderas empinadas a escarpadas, largas y rectas. En la parte baja se identifican colinas de altura media y laderas moderadas, desarrolladas en suelos residuales. Estos sistemas se ubican al occidente de San Antonio de Prado.

- **Bloque Quebrada La Candela (VS-BQLC).** Macrounidad de poca extensión ubicada en la parte media de la ladera derecha de la quebrada Doña María.

Está limitada al sur por el cauce de la quebrada La Despensa, al norte por el cauce de la quebrada Larga y al este por la quebrada Doña María. Geológicamente relacionada a antiguos depósitos de vertiente, con un alto grado de meteorización.

Geomorfológicamente se caracteriza por zonas de topografía suave a ondulada de extensión y alturas variables ubicadas inmediatamente al este de la traza de la falla San Jerónimo y que se asociarían a antiguas zonas de depositación, donde es factible también identificar rasgos de afectación tectónica, tales como la deflexión sistemática de los cauces de las quebradas mencionadas (AMVA, 2007).

- **Fondo de Valle (VS-FV).** ~~Corresponde como su nombre lo dice, al fondo del valle del río, identificándose tanto en el valle Superior como en el valle Medio; caracterizada por ser una zona conformada casi en su totalidad por depósitos aluviales y aluviotorrenciales, con esporádicas ventanas erosivas de rocas metamórficas entre los que se identifican los cerros el Volador y Nutibara. Es una zona de pendientes rectas a levemente cóncavas en su cercanía a las vertientes occidental y oriental del valle. Estas zonas están relacionadas a los eventos de depositación del río Medellín y su red de drenaje asociada (AMVA, 2007).~~ Específicamente para el Distrito de Medellín, el Bloque del Fondo del Valle Fondo de Valle como su nombre lo dice, hace referencia al fondo del valle del rio, identificándose tanto en el valle Superior (VS-FV), asociado a la llanura aluvial de su afluente la quebrada Doña María, como en el valle Medio (VS-FM); caracterizada por ser una zona conformada casi en su totalidad por depósitos aluviales y aluviotorrenciales, con esporádicas ventanas erosivas de rocas metamórficas entre los que se identifican los cerros el Volador y Nutibara. Es una zona de pendientes rectas a levemente cóncavas en su cercanía a las vertientes occidental y oriental del valle. Estas zonas están relacionadas a los eventos de depositación del rio Medellín y su red de drenaje asociada (AMVA, 2007).

4.3.1.2 Valle de Aburrá Medio (VM).

Esta macrounidad está representada por 8 bloques que se describen a continuación.

- **Bloque Comuna Nororiental Alta (VM-BCNA).** Esta macrounidad corresponde a una franja de terreno alargada en sentido N-S, desarrollada sobre rocas ultrabásicas (Dunitas de Medellín) y muy localmente sobre depósitos de vertiente. Su característica principal es el claro control estructural.

Está limitada al noreste por el cauce de la quebrada Rodas, que coincide con la traza de la falla de igual nombre; al sureste por el altiplano de Santa Elena; al sur por el filo que sirve de divisoria de aguas con la quebrada Chorro Hondo y al este por varias fallas de tendencia N-S. Esta franja de terreno involucra alturas desde los 2.600 msnm en inmediaciones de Santa Elena hasta los 1.750 msnm por

debajo de los barrios San Blas y Santo Domingo Savio. Predominan las pendientes moderadas, con algunos sectores escarpados hacia la parte alta y sobre la vertiente derecha de la quebrada La Sucia (límite Bello - Medellín), además de algunos sectores de pendientes suaves que a su vez conforman una franja en el centro de la macrounidad, definiendo de esta manera un escalonamiento de la vertiente.

El avance remontante del frente erosivo del río Aburrá·, a través de las corrientes del sector, ha generado un sistema de lomos, que en la parte norte tienen una tendencia N-W a N-S (paralelos a la falla Rodas) y en el sector sur E-W. Dichos lomos en general tienen flancos empinados, rectos y de tope agudo; además, las corrientes que los separan transcurren por profundos y estrechos cañones con tendencias similares.

En medio de esta unidad geomorfológica, con una distribución irregular, se identifican áreas de topografía suave, orientadas en sentido N-S y desarrolladas sobre suelos residuales de dunitas. Por su paralelismo con estructuras regionales se interpretan como Peldaños, cuya correlación altitudinal con otras zonas suaves localizadas en esta misma vertiente y en las adyacentes debe ser motivo de investigaciones posteriores, de tal manera que se refine su modelo genético. En el sector de Santo Domingo Savio se presenta en medio de la vertiente un cerro de carácter regional, el cual tiene una base oval de tendencia N-S y laderas empinadas, el cual fue cartografiado como Picacho. Finalmente, hacia la parte baja de polígono y en estrecha relación espacial con las fallas N-S se identificaron una serie de facetas triangulares, definidas en este trabajo como rasgos morfotectónicos (AMVA, 2007).

- **Bloque Comuna Nororiental Baja (VM-BCNB).** En estrecha relación con la macrounidad anterior se presenta otra franja de terreno de tendencia también N-S, ocupando terrenos entre los 1.750 y 1.450 msnm. Limitada al este por una serie de fallas y lineamientos de tendencia N-S; al sur por la zona suave de los depósitos aluviotorrenciales asociados a la quebrada Santa Elena, al oeste y norte por el río Aburrá y/o sus depósitos aluviales asociados.

Dentro de esta macrounidad se identifican dos sectores. Al norte se caracteriza por pendientes regulares y continuas de inclinación suave a moderada con dirección hacia al fondo del valle; geológicamente relacionados a suelos residuales de rocas ultrabásicas y localmente por depósitos de vertiente; además de una red de vaguadas moderadamente incisadas de flancos cortos, irregulares y de pendientes moderadas.

Al sur se caracteriza por pendientes suaves que descienden hasta el fondo del valle y geológicamente relacionados a depósitos de flujo de lodos y/o escombros con diverso grado de incisión; también se identificaron una serie de zonas de pendiente suave a diferentes alturas, que por su localización (cercana a las trazas de las fallas o lineamientos) u orientación se cartografiaron como peldaños. Dentro de estos llama la atención el sector de Aranjuez – Brasilia (AMVA, 2007).

- **Bloque Santa Elena (VM-BSE).** Corresponde a parte alta de la cuenca de la quebrada Santa Elena, fuera del Valle de Aburrá. Este polígono tiene la forma semicircular característica de un

frente erosivo, realzada por el contraste morfológico respecto a los remanentes de la superficie de erosión localizados al oriente y que están claramente cortados por este rasgo regional. Dentro de esta macrounidad se observa el predominio de laderas empinadas y escarpadas hacia la parte superior (cota 2.650 msnm aproximadamente), definiendo un sistema de escarpes semicirculares asociados a las cabeceras de las quebradas del sector. Por debajo de estas vertientes y como resultados también de la erosión, se identificaron varios tipos de lomos.

Sobre la vertiente sur (margen derecha de la quebrada Santa Elena), los lomos tienen orientación S-N a SSE-NNW, con topes redondeados, flancos convexos y vaguadas intermedias, estrechas y moderadamente entalladas. Por el contrario, los lomos de la vertiente norte exhiben topes agudos, flancos rectos, empinados y vaguadas profundamente encañonadas (Qdas La Castro y Chorro Hondo); además, presentan orientación diversa con claros efectos tectónicos en la parte inferior, sector de Las Estancias y La Sierra, siguiendo los lineamientos cartografiados.

Un rasgo característico de esta macrounidad es la presencia de descansos topográficos o zonas de pendiente suave en medio de las laderas, definidos en este trabajo como peldaños. Especial atención merece el ubicado sobre la vertiente derecha de la cuenca, con una altura de aproximadamente 1.900 msnm (centro de meditación Las Mercedes).

Finalmente, en la parte centro occidental del polígono, especialmente sobre la parte baja de la ladera izquierda (sector de Quinta Linda y Caunces de Oriente) se observan zonas de topografía ondulada e inclinaciones suaves, que corresponden a depósitos de vertiente con diverso grado de incisión (AMVA, 2007).

- **Bloque El Salvador (VM-BES).** Corresponde a la margen izquierda de la cuenca baja de la quebrada Santa Elena, sobre el extremo occidental y el flanco norte del lomo regional que involucra los terrenos del Seminario Mayor de Medellín. Este polígono ocupa terrenos desde los 2.100 y los 1.500 msnm. Geomorfológicamente está representado por vertientes suaves a moderadas, cóncavas e irregulares; las cuales están constituidas por suelos residuales del Gabro de San Diego y depósitos de vertiente.

Hacia la parte alta de la margen norte de la cuenca de la Santa Elena y toda la vertiente occidental (hacia el río Medellín) se presentan lomos irregulares, poco incisados y de baja altura, con topes redondeados y amplios. Más abajo, cerca de la quebrada Santa Elena, se presenta una ladera regular poco incisada desarrollada en suelos residuales. En el extremo noroccidental de este polígono se presenta un cerro bajo, de vertientes moderadas, tope suave y amplio que resalta en el oriente de Medellín, denominado cerro El Salvador; el cual fue denominado picacho. En sus flancos, especialmente hacia la quebrada Santa Elena, se identifican una serie de laderas muy suaves, cuya configuración revela su origen depositacional (flujos de lodos y/o escombros) además de superficies en suelos residuales poco incisados (p.e. barrio Las Palmas). (AMVA, 2007).

- **Bloque Iguaná Superior (VM-BIS).** Esta macrounidad tiene forma de rombo alargado en dirección N-S; se ubica en el extremo centro occidental del Valle de Aburrá; está limitado al sureste por el cauce de la quebrada San Francisca, al noreste por el de la quebrada La Iguaná (en sus tramos medio y alto) y al occidente se extiende hasta la divisoria de aguas entre el Valle de Aburrá y el río Cauca, involucrando el lado sur del Boquerón, y el cerro del Padre Amaya.

Las alturas varían entre los 3.050 (Padre Amaya) y 1.800msnm en la confluencia entre las quebradas San Francisca y La Iguaná. Define una ladera con desarrollo de lomos bajos y vaguadas poco profundas y amplias (bajo grado de incisión) y con una orientación persistente al este. La inclinación es en general moderada, aunque en la parte alta se torna empinada definiendo un escarpe lineal de tendencia SSE-NNW, similar al tren estructural regional.

Debajo del escarpe lineal se identifican lomos de topes amplios con tendencia W-E, geológicamente desarrollados en suelos residuales del Stock de Altavista, los lomos no presentan una clara correlación altitudinal.

En la parte más baja de esta vertiente y paralelo al cauce de La Iguaná, se identifican varias facetas triangulares asociadas a la falla Tenche, a partir de la cual se han cartografiado depósitos de vertiente y aluviales con un bajo grado de incisión. En la quebrada San Francisca y en la divisoria de aguas de La Tenche se identifican depósitos de vertiente y aluviales de mayor altura que los anteriores (AMVA, 2007).

- **Bloque El Poblado – Envigado (VM-BPE).** Esta macrounidad se localiza sobre la vertiente oriental del Valle de Aburrá, sector de El Poblado. Está limitada al sur por el cauce de la quebrada La Ayurá, al este por el marcado cambio morfológico con la zona del oriente antioqueño y sus típicos remanentes de superficies de erosión; al oeste por un pequeño escarpe erosivo asociado al frente de los depósitos de vertiente generados en su interior y al norte la divisoria de aguas con la cuenca de la quebrada Santa Elena.

Este polígono está caracterizado por laderas irregulares de forma cóncava, que descienden desde los 2.650 hasta los 1.550 msnm. La parte alta de la ladera caracteriza por pendientes empinadas a escarpadas, cuya distribución define una franja de tendencia N-S, correspondientes al escarpe lineal superior. Sobre la parte norte de este escarpe se han esculpido varios escarpes semicirculares por el avance del frente erosivo de quebradas como La Presidenta y La Escopetería. Debajo de esta franja se establece un sistema de lomos de tendencia E-W, de tope redondeado y amplio, flancos convexos y desarrollados casi en su totalidad sobre suelos residuales y los más antiguos depósitos de vertiente.

La parte media y baja de la vertiente está constituida por una serie de depósitos de vertiente del tipo flujo de lodos y/o escombros, los cuales han sido objeto de estudios estratigráficos y dataciones (Rendón, 2003 y Rendón et al., 2006) que permitieron diferenciar varias series de eventos con firmas geomorfológicas también diferentes. En este trabajo se identifican los diferentes eventos como superficies suaves de depositación con alto, medio y bajo grado de incisión. Finalmente, en la parte

más baja se presentan superficies muy suaves (barrio Manila, Avenida de El Poblado) a unos 30 m de altura respecto a la llanura aluvial del río Medellín. Estos depósitos terminan en un escarpe erosivo, producto de la antigua dinámica meándrica del río mencionado (AMVA, 2007).

- **Bloque Itagüí – San Cristóbal (VM-BISC**). Se ubica al occidente de la ciudad de Medellín, correspondiente a la totalidad de las cuencas de las quebradas Guayabala, La Picacha, Altavista, Ana Díaz, La Hueso y La Pelahueso; además, de un tramo de la margen derecha de la quebrada La Iguaná. Esta macrounidad que se extiende desde los 2700 hasta los 1500 msnm. Geológicamente se caracteriza por rocas del Stock de Altavista, el gneis de La Iguaná y Metabasitas y los depósitos de vertiente.

La presencia de lomos regionales de tendencia W-E es la característica fundamental de esta macrounidad. Dichos lomos forman valles en "V" de fondo estrecho con vertientes largas, rectas a cóncavas y de inclinación moderada a localmente empinadas. Hacia las cabeceras las laderas rematan en escarpes semicirculares, evidencia del proceso remontante del frente erosivo del río Aburrá. El tope de los lomos es en general estrecho y redondeado, con pendientes longitudinales suaves moderadas. Se presentan en general relieves relativos menores y se conforman sistema de colinas medias a altas con base circular y laderas empinadas (AMVA, 2007).

- **Bloque Robledo – Pedregal (VM-BRP).** Corresponde a la vertiente noroccidental de la ciudad de Medellín, limitada al sur y al occidente por el cauce de la quebrada La Iguaná, al oriente por el río Aburrá y al norte por la quebrada La Loca hasta sus cabeceras y continuando por la divisoria de aguas hasta la serranía de Las Baldías.

Presenta alturas que oscilan entre los 2.800 y los 1.550 msnm; geológicamente representado por depósitos de vertiente, con esporádicas ventanas erosivas de rocas metamórficas meteorizadas (gneis, metagabros y anfibolitas). Geomorfológicamente se define como una ladera homogénea, con vertientes largas, continuas, rectas a levemente cóncavas, prácticamente sin cambios marcados en la continuidad o pendiente desde la divisoria de aguas hasta el fondo del valle. Estas laderas tienen un aspecto claramente correlacionable con grandes eventos de depositación de materiales de vertiente. Sin embargo, la distribución de estos materiales hasta la parte más alta de la vertiente complejiza el análisis, puesto que no es factible identificar una zona fuente que permita generar estos enormes volúmenes de material (AMVA, 2007).

- **Fondo de Valle (VM-FV).** Como se menciona previamente, para el Distrito de Medellín, el Bloque del Fondo del Valle como su nombre lo dice, hace referencia al fondo del valle del rio, identificándose tanto en el valle Superior (VS-FV), asociado a la llanura aluvial de su afluente la quebrada Doña María, como en el valle Medio (VS-FM); caracterizada por ser una zona conformada casi en su totalidad por depósitos aluviales y aluviotorrenciales, con esporádicas ventanas erosivas de rocas metamórficas entre los que se identifican los cerros el Volador y Nutibara. Es una zona de pendientes rectas a levemente cóncavas en su cercanía a las

vertientes occidental y oriental del valle. Estas zonas están relacionadas a los eventos de depositación del rio Medellín y su red de drenaje asociada (AMVA, 2007).

4.3.1.3 Cuenca del Cauca (CC).

Esta unidad de paisaje, como ya se mencionó, corresponde a una pequeña porción de la vertiente oriental del cañón del Cauca (Unidad de Relieve). Por su escasa extensión respecto a la vertiente mencionada no es factible contextualizarla geomorfológicamente.

- **Bloque San Sebastián de Palmitas.** Este bloque hace parte de la vertiente oriental del gran cañón del río Cauca, en este predominan las laderas empinadas y escarpadas, asociadas a al frente erosivo del Cauca contra la cordillera Central, el cual avanza a través de las cabeceras de las quebradas La Chuscala, La Potrera y La Frisola. Hacia la parte baja, donde se localiza la antigua vereda La Aldea la morfología presenta un fuerte control estructural, con presencia de picachos, peldaños y otros rasgos morfotectónicos; asociados todos ellos al sistema Romeral (AMVA, 2007).

4.3.2 Unidades geomorfológicas

~~Para el desarrollo de esta variable se utiliza como insumo base la cartografía geomorfológica existente a escala 1:10.000 del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), la cual fue actualizada y redelimitada con base en la información obtenida del análisis de sensores remotos, la interpretación de fotografías aéreas y el trabajo de campo de los estudios de detalle, donde es posible identificar unidades principalmente cuaternarias, asociadas a depósitos de vertientes, depósitos aluviotorrenciales, depósitos aluviales y llenos antrópicos.~~

La descripción jerárquica de la geomorfología, está basada en la información base la cartografía geomorfológica a escala 1:100.000 adelantada por CORANTIOQUIA en el territorio de su jurisdicción durante el año 2003, y en este contexto metodológico se definen las unidades geomorfológicas como el conjuntos de geoformas del mismo tipo, originadas por el mismo proceso y durante el mismo tiempo, y en algunos casos se describen a mayor detalle rasgos geomorfológicos individuales o partes constitutivas de estas geoformas pero siguiendo la homogeneidad de proceso genético y la edad. De esta forma, con el objetivo de mantener la metodología descriptiva desarrollada a nivel regional por las instituciones de CORANTIOQUIA y el AMVA, el concepto de unidades geomorfológicas se puede asemejar de acuerdo con el Decreto 1077 de 2015 con las subunidades geomorfológicas, definidas de acuerdo con la metodología del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2012) como las geoformas caracterizadas por un proceso geomorfológico dominante y determinada por los contrastes morfológicos y morfométricos, que relacionan el tipo de material o la disposición estructural de éstos con la correspondiente topografía del terreno.

Finalmente, la delimitación de las unidades geomorfológicas descritas a continuación fue actualizada y redelimitada a escala 1:10.000 con base en la información obtenida del análisis de sensores remotos, la interpretación de fotografías aéreas y el trabajo de campo de los estudios de detalle, donde es posible identificar unidades principalmente cuaternarias, asociadas a depósitos de vertientes, depósitos aluviotorrenciales, depósitos aluviales y llenos antrópicos.

A continuación, se presenta la zonificación geomorfológica (Ilustración 26) y la descripción y ubicación de cada una de las unidades geomorfológicas.

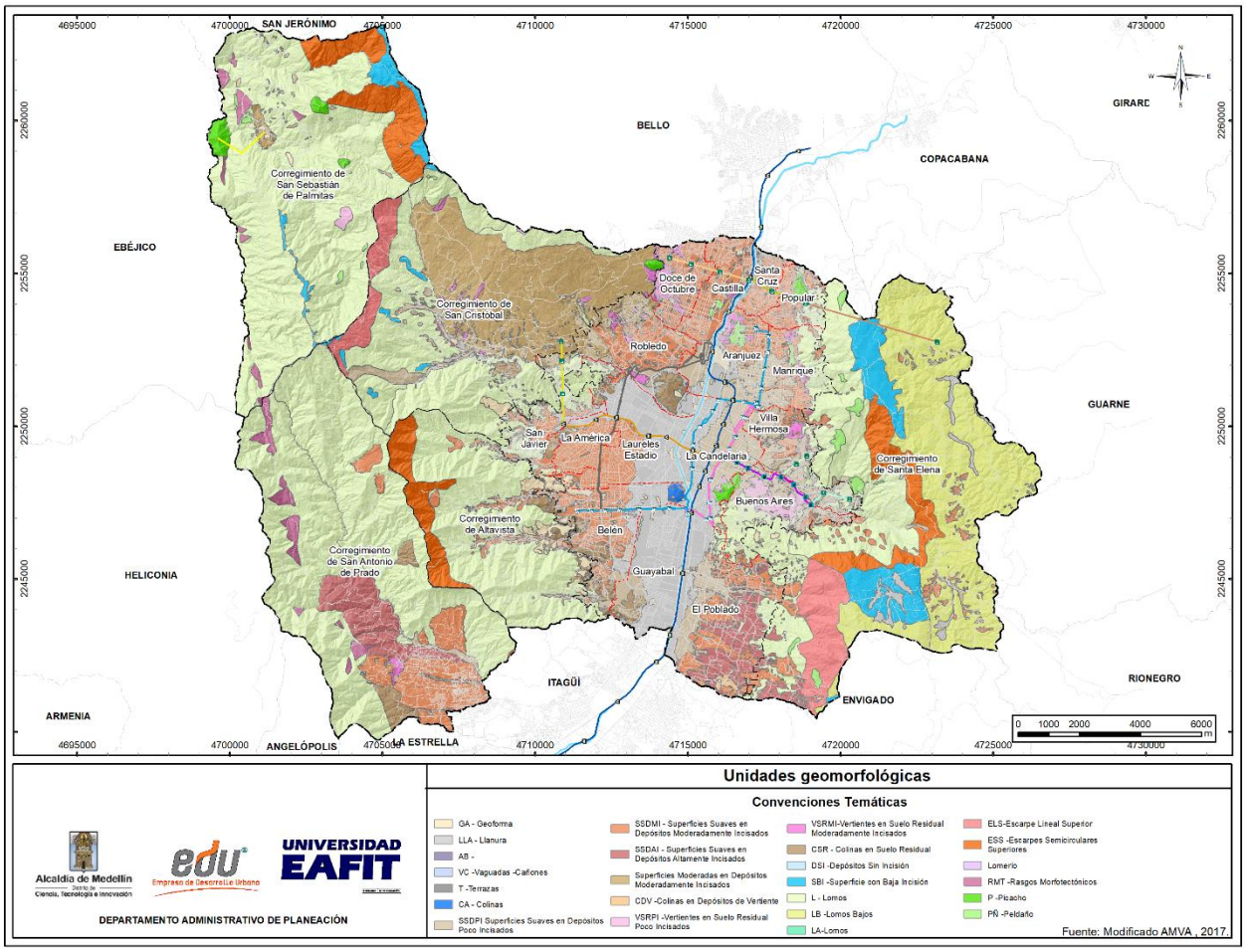
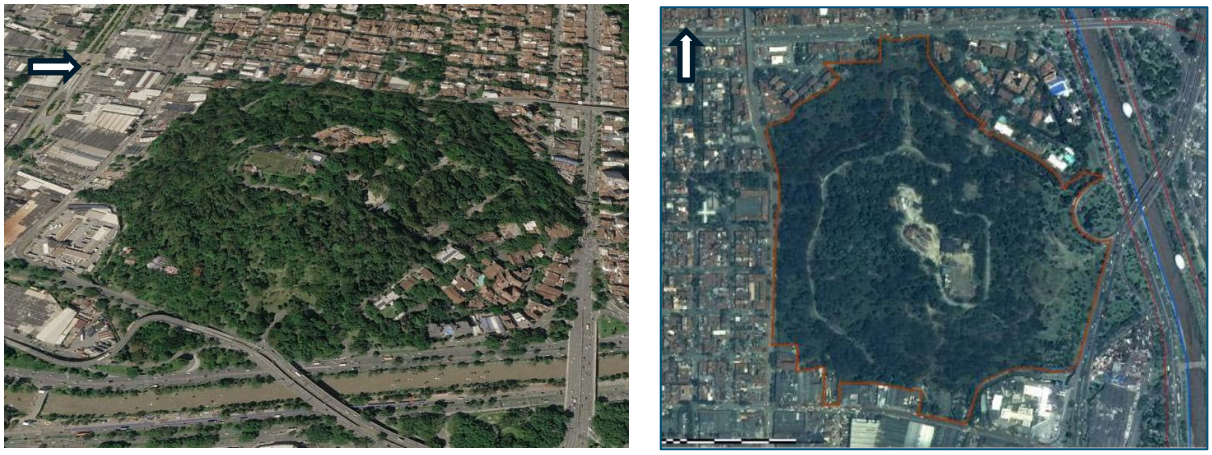


Ilustración 26. Mapa de unidades geomorfológicas del Distrito de Medellín

Fuente: Adaptado de AMVA (2007)

CA – Colinas Aisladas: Es una elevación menor del terreno que se destaca aisladamente hacia el sector del barrio Cerro Nutibara, presenta topes redondeados y sus pendientes varían en rangos de muy inclinada a abrupta. Esta unidad corresponde al cerro Nutibara (Ilustración 27).



(a) (b)

Ilustración 27. Cerro Nutibara imagen A tomado de Google Earth 2026, e Imagen B tomada del Plan de Manejo del Área de Recreación Parque Ecológico Cerro Nutibara

Fuente: AMVA, 2011

CDV - Colinas en depósito de vertiente. Estas geoformas son pequeñas elevaciones que se localizan generalmente a media ladera en las partes medias de las vertientes. Pueden corresponder a flujos de lodos y/o escombros, de espesores variables y con alto grado de madurez. Se ubica hacia el sector sur oriental del municipio, a la altura del barrio San Lucas.

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

En la zona está asociada a suelos residuales del Stock de Altavista. La mayor representación de esta unidad se observa en el sector suroccidental del área urbana hacia la parte alta de la comuna Belén, y sectores aislados como el cerro El Volador y Calasanz parte Alta; en el área rural está representada en sectores de las Veredas La Loma, El Salado y La Florida.

ELS - Escarpe Lineal Superior. Son terrenos de fuertes inclinaciones, con pendientes casi perpendiculares continuas, las cuales pueden ser la evidencia de lineamientos estructurales (falla o fractura). Geomorfológicamente se caracteriza por vertientes largas, rectas e irregulares con una fuerte incisión, generando cañones profundos. Se localizan en dos sectores; el primero se ubica al noroccidente, parte alta de las veredas Boquerón, Naranjal, La Cuchilla, El Uvito y El Patio; El segundo sector se ubica al sureste del distrito, parte alta de la vereda Las Palmas y una franja de la vereda El Plan (ver Ilustración 28).



Ilustración 28. Escarpe lineal superior localizado en el Corregimiento de Santa Elena, sector sureste del Distrito.

Fuente: Universidad EAFIT, 2026

ESCS - Escarpes semicirculares superiores: Son geoformas ubicadas entre zonas escarpadas en superficies rocosas hacia los límites de los altiplanos, presentan pendientes muy abruptas a escarpadas. Geológicamente relacionadas a la anfibolita y dunita de Medellín, Stock de Altavista, gneis de Palmitas y esquistos.

Esta unidad se identifica en tres sectores; el primero se localiza al oriente del distrito, parte alta de la quebrada Santa Elena, jurisdicción de las veredas Media Luna y Las Palmas. El segundo sector se ubica al occidente, parte alta de las veredas El Corazón el Morro, Aguas Frías y Buga Patio Bonito y el tercer sector se identifica al noroccidente del distrito, hacia las veredas Urquitá, Potrera Miserenga y Palmitas sector central.

GA - Geoforma Antrópica. Están definidas por ser unas unidades recientes y en su totalidad han sido creadas por el hombre a modo de llenos y antrópicos relacionados a la minería, construcción, rellenos sanitarios; excavaciones, terraceos, entre otras (ver Ilustración 29).

Esta unidad está representada por unidades de diferentes extensiones distribuidas por todo el distrito; se observa en la zona de las ladrilleras de Belén, ejes viales y un mosaico de llenos, caracterizados por su heterogeneidad en forma y tamaño y distribuidos por toda el área urbana.



Ilustración 29. Geoforma antrópica relacionado con el relleno sanitario abandonado conocido como cerro de Moravia.

Fuente: Universidad EAFIT, 2026

LR – Lomerío. Es una zona de lomos bajos, que ya han sido disectados por acción del intemperismo y la erosión. Esta unidad se ubica al norte del distrito, hacia los límites con el altiplano, pequeños sectores de las veredas El Yolombo, La Ilusión y San José de la Montaña.

L – Lomos: Son filos alargados y estrechos con orientación hacia el eje fluvial principal. Son las unidades dominantes y de mayor cobertura dentro del área de estudio (AMVA, 2007).

Es la unidad geomorfológica de mayor representación en el distrito, corresponde a un sector importante del área occidental del distrito y una franja central con dirección N-S en la vertiente oriental; está unidad está asociada al Stock de Altavista, Esquistos, Quebradagrande, gabros de Romeral, dunita de Medellín, Anfibolita de Medellín (Ilustración 30).



Ilustración 30. Lomos de la parte alta de la comuna 3 Manrique.

Fuente: Universidad EAFIT, 2026

LB - Lomos Bajos. Son lomos alargados de mediana longitud, sin tendencia de orientación preferencial con un grado de disección medio a bajo por parte de las corrientes presentes.

Se localiza hacia la zona del altiplano del oriente de Medellín, sector del corregimiento de Santa Elena, veredas Piedras Blancas, Mazo, Piedra Gorda, Barro Blanco, El Placer, Santa Elena sector central y El Cerro (ver Ilustración 31).



Ilustración 31. Lomos bajos localizados en la vereda el Cerro del Corregimiento de Santa Elena.

Fuente: Universidad EAFIT, 2026

PÑ – Peldaño. Son geoformas relativamente continuas, con una pendiente suave a moderada. Se ubican a media ladera, distribución sin tendencia especifica; en su mayoría se ubican en la vertiente nororiental y con menor representación hacia el noroeste y sureste del distrito (Ilustración 32).



Ilustración 32. Peldaño localizado en el sector de Media Luna en el corregimiento de Santa Elena

Fuente: Universidad EAFIT, 2026

P - Picacho: Son cerros o prominencias que se destacan en el paisaje, ubicados a diferentes alturas y con formas diferentes, sus pendientes son de moderadas a fuertes y localmente escarpadas.

Entre los más importantes se mencionan, El Volador, Pan de Azúcar (Ilustración 33) y El Picacho.



Ilustración 33. Picacho conocido como Pan de Azúcar localizado en el corregimiento de Santa Elena en la vereda Piedras Blancas – Matasano

Fuente: Universidad EAFIT, 2026

RMT - Rasgos Morfotectónicos: Son pequeños cuerpos que coinciden con zonas de rasgos tectónicos como lineamientos, fallas y contactos geológicos. Hacia el extremo occidente del distrito de Medellín se presentan las mayores expresiones de esta unidad; con una menor expresión se identifican en la zona intermedia de la comuna 3 -Manrique y comuna 8 – Villa Hermosa.

SBI - Superficies con Baja Incisión. Esta unidad corresponde. a lomos alargados que se localizan cerca de zonas escarpadas. La mayor expresión se identifica en el sector norte y sur del corregimiento de Santa Elena y con menor expresión hacia el noroccidente, en inmediaciones del corregimiento de San Cristóbal.

SMDMI - Superficies Moderadas en Depósitos Moderadamente Incisados. Corresponde a una geoforma continua de inclinación moderada y modelada sobre los depósitos de vertiente del tipo flujos de lodos y/o escombros. Presentan un grado de incisión medio.

Esta unidad tiene su mayor representación al noroccidente del distrito, correspondiente a la zona de los barrios Picacho, Aures, Monteclaro y veredas Boquerón, San José de la Montaña, El llano, Travesías, La Ilusión, Pedregal Alto, Yolombo, Pajarito, entre otras (ver Ilustración 34).



Ilustración 34. Superficies moderadas en depósitos moderadamente incisados localizados en la vereda Boquerón del corregimiento de San Cristóbal

Fuente: Universidad EAFIT, 2026

SSDAI - Superficies Suaves en Depósitos Altamente Incisados. Son geoformas continuas de inclinación suave a moderada y modeladas sobre depósitos de vertiente del tipo flujos de lodos y/o escombros. Presentan un grado de incisión alto. Esta unidad se localiza al sureste del distrito, hacia el sector de los barrios La Florida, El Tesoro, Alejandría, Los Naranjos, Los Balsos No 1 y2, El Castillo, San Lucas y El Diamante No2 y un sector de la vereda Las Palmas. Un segundo sector se ubica al suroccidente, en jurisdicción de las veredas El Salado, Montañita, Potrerito, La Verde y San Antonio de Prado.

SSDMI - Superficies Suaves en Depósitos Moderadamente Incisados: Son geoformas continuas de inclinación suave a moderada y modeladas sobre depósitos de vertiente del tipo flujos de lodos y/o escombros. Presentan un grado de incisión moderado.

Esta unidad se distribuye por todo el distrito, con tendencia hacia la comuna 6 – Castilla, parte alta de la comuna 13 – San Javier, sectores de la comuna 16 – Belén, comuna 14 – El Poblado, entre otros sectores de menor extensión hacia los barrios Santo Domingo, Carpinelo, Carambolas y Los mangos y un sector del corregimiento de San Antonio de Prado.



Ilustración 35. Superficies Suaves en Depósitos Moderadamente Incisados localizados en el barrio de Santo Domingo Savio No 2 de la Comuna 1 Popular al nororiente del Distrito.

Fuente: Universidad EAFIT, 2026

SSDPI - Superficies Suaves en Depósitos Poco Incisados: Son geoformas continuas de inclinación suave a muy inclinadas y modeladas sobre depósitos de vertiente del tipo flujos de lodos y/o escombros. Presentan un grado de incisión baja a muy baja (Ilustración 36).

Esta unidad se distribuye por varios sectores del distrito, entre los más representativos se identifica la parte baja de la comuna 14 – El Poblado, sectores en la confluencia de las comunas 3 (Manrique), 4 (Aranjuez), 8 (Villa Hermosa), 10 (La Candelaria); Confluencia de las comunas 16 (Belén) y 15 (Guayabal) y con menor representación hacia los corregimientos de San Cristóbal y San Antonio de Prado.



Ilustración 36. Superficies Suaves en Depósitos Poco Incisados, localizados en la Comuna 4 Aranjuez y en la parte baja de la Comuna 3 Manrique.

Fuente: Universidad EAFIT, 2026

VSRMI - Vertientes en suelos residuales moderadamente incisadas. Son vertientes que pueden presentar filos de formas estrechas y con topes agudos a ligeramente convexos. Están enmarcados por superficies de depósitos y estos están constituidos por suelos residuales de diferente composición. Esta unidad se distribuye en la zona norte, en pequeñas áreas en las comunas 2 – Santa Cruz, 4 - Aranjuez, 5 - Castilla, 6 – Doce de Octubre, 7 – Robledo, 8 – Villa Hermosa y el corregimiento de San Cristóbal (Ilustración 37).



Ilustración 37. Vertientes en suelos residuales moderadamente incisados localizadas al noroccidente del Distrito en las comunas 7 Robledo, 6 Doce de Octubre y 7 Castilla,

Fuente: Universidad EAFIT, 2026

VSRPI - Vertientes en Suelos Residuales Poco Incisadas. Son pequeñas vertientes que pueden presentar filos de formas estrechas y con topes agudos a ligeramente convexos, presentan un bajo grado de incisión. Están enmarcados por superficies de depósitos y estos están constituidos por suelos residuales de diferente composición dependiendo del sitio donde se localizan. La mayor expresión de esta unidad se encuentra en la zona de la comuna 9 – Buenos Aires y un sector el corregimiento de Santa Elena.

LLA - Llanura Aluvial. Esta unidad involucra el cauce y las riberas del río Aburrá y algunas de sus quebradas o tributarios principales. Es una forma continua, de pendientes suaves y topografía plana; contiene materiales producto de la sedimentación aportada por estas corrientes e incluye además algunos niveles de terrazas bajas y depósitos aluviotorrenciales de las principales corrientes, entre las que se mencionan La Iguaná, Ana Díaz, La Guayabala, Altavista y Santa Elena (Ilustración 38).

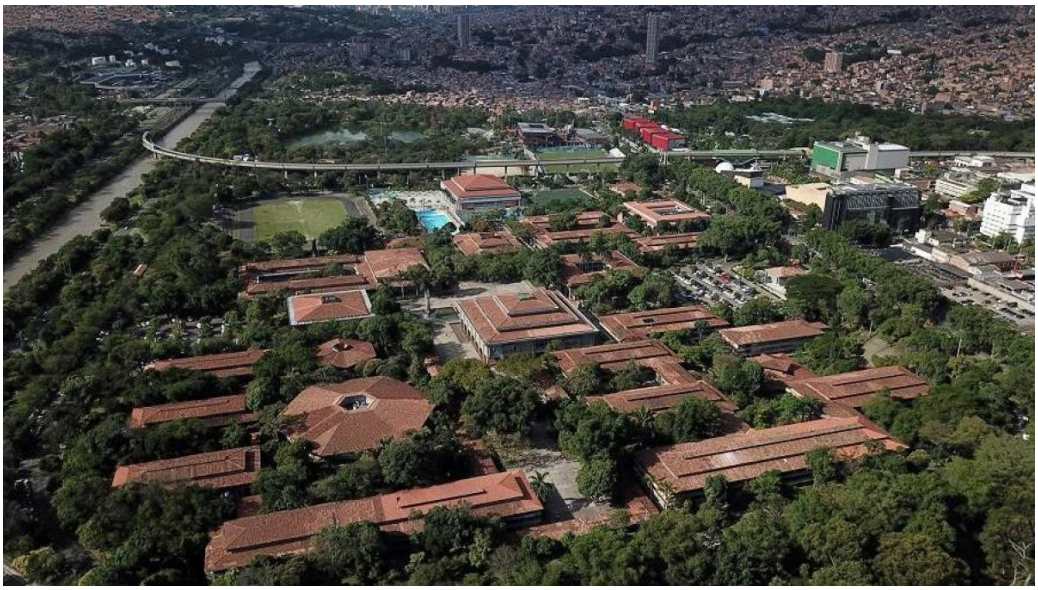


Ilustración 38. Llanura aluvial del río localizado a la altura de la Universidad de Antioquia, Parque Norte, Jardin Botánico y el barrio Sevilla de la Comuna 4 Aranjuez

Fuente: https://www.udea.edu.co/

5 VARIABLES DEL MODELO

En la caracterización de las unidades geomorfológicas se define la morfología asociada a cada una de ellas, la cual está relacionada con los aspectos de la geometría e incluye fundamentalmente los gradientes topográficos y las formas relativas, por lo tanto es necesario incluir las variables morfométricas, para las cuales se emplea la información almacenada en el DEM y corresponde a los aspectos cuantitativos en términos de medidas métricas y se compone de seis ~~cinco~~ atributos básicos: pendientes, rugosidad, curvatura, índice de relieve relativo, aspecto y dirección de flujo, además incluye las variables físico-espaciales, que define la distancia a elementos como drenajes, vías y fallas.

El procesamiento de la información para la consecución de las variables se realizó a una escala 1:2.000 y se encuentra descrita en el Anexo 4.

5.1 VARIABLES MORFOMÉTRICAS

5.1.1 Pendientes

Se entienden como el ángulo de inclinación de una ladera con respecto a la horizontal, se expresan en grados o porcentaje. Esta variable está directamente relacionada con la ocurrencia de movimientos en masa, al tratarse estos de fenómenos gravitacionales en los que las pendientes moderadas a fuertes están asociadas a mayores aceleraciones. Sin embargo, la pendiente también influye en la formación del suelo puesto que, en general, los suelos se desarrollan en zonas de menor inclinación, mientras que en pendiente mayores predominan perfiles con menores o nulos espesores, especialmente en áreas abruptas donde son comunes los procesos de caídas de rocas. Por lo anterior, el comportamiento de esta variable se ajusta cualitativamente a una función de tipo senoidal.

Es importante mencionar que el modelo de elevación presenta deficiencias en la depuración de estructuras antrópicas, lo que genera 'pendientes espurias' (ficticias) principalmente en el sector de El Poblado al no procesar correctamente la altimetría de las edificaciones.

En el Distrito de Medellín, las pendientes muy abruptas (60%–100%) y abruptas (40%–60%) representan el 25,2% y el 18,8% del territorio, respectivamente, y que, en conjunto, representan el 43,9% de todo el territorio. Estas se concentran principalmente en la zona rural occidental (veredas), aunque también se extienden por la ladera oriental, especialmente en las veredas Media Luna, Las Palmas y Piedras Blancas–Matasano, así como en barrios urbanos adyacentes. En el valle se destacan en los cerros tutelares (ver Ilustración 39).

Las pendientes inclinadas (10%–25%) y muy inclinadas (25%–40%) abarcan el 17,2% y el 15,2% del área, respectivamente, con una distribución amplia tanto en la zona urbana como en las ladeas

oriental y occidental, así como en el corregimiento de Santa Elena y en zonas asociadas a la red hídrica.

Las pendientes suaves (3%–10%) se localizan principalmente en los depósitos aluviales de la margen oriental del río Aburrá, en algunos topes y en zonas de depósitos de flujos de lodos y/o escombros. El rango de pendientes muy suaves (0%–3%) cubre apenas el 5,8% del área del Distrito. Estas últimas categorías dominan el área urbana, que se encuentra rodeada por laderas abruptas y muy abruptas.

Por último, las pendientes escarpadas (>100%) representan el 6,5% del territorio, con mayor presencia en la zona occidental, donde están especialmente asociadas a fuentes hídricas.

La Tabla 5 presenta la distribución porcentual de estas clases de pendientes para el Distrito de Medellín.

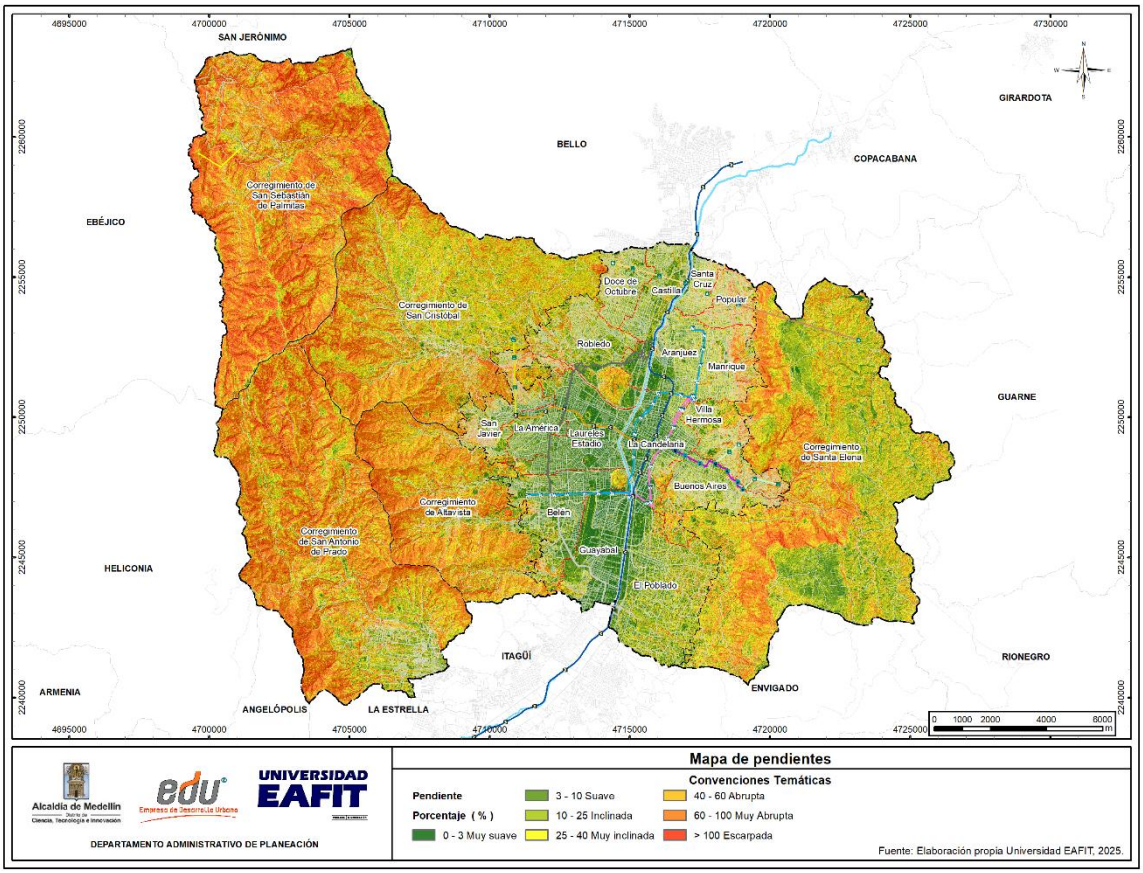


Ilustración 39. Mapa de pendientes para el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Tabla 5. Distribución de las clases de pendientes para el Distrito de Medellín

Rango	Clasificación	Área (Ha)	Porcentaje del Territorio
Muy suave	0%–3%	2.176,60	5,8
Suave	3%–10%	4.303,33	11,4
Inclinada	10%–25%	6.477,48	17,2
Muy inclinada	25%–40%	5.710,31	15,2
Abrupta	40%–60%	7.064,58	18,8
Muy abrupta	60%–100%	9.475,00	25,2
Escarpada	>100%	2.431,79	6,5

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

5.1.2 Rugosidad

Es una variable que refleja la variación de la pendiente dentro de un área específica y se calcula a partir de la desviación del vector normal a la superficie de cada celda del DEM, considerando áreas de 2x2 celdas. Su valor está normalizado en un rango de 0 a 1, donde los valores más altos indican superficies más regulares, es decir, menos rugosas, mientras que valores más bajos reflejan mayor dispersión de los vectores y, en consecuencia, mayor rugosidad.

Desde el punto de vista de la amenaza por movimientos en masa, la rugosidad permite identificar diferencias morfológicas entre crestas, laderas y valles, asociando una mayor susceptibilidad a deslizamientos en zonas de alta rugosidad, debido a la complejidad del relieve y a la mayor fragmentación de las pendientes.

En el caso del Distrito de Medellín, se reorganizaron los rangos de clasificación de esta variable para ajustarlos a las condiciones específicas del territorio debido a su heterogeneidad en el territorio:

- El 66,3% del área de estudio presenta valores altos o muy altos de rugosidad, concentrados principalmente en las laderas distribuidas a lo largo del municipio.
- El 16,1% muestra valores medios, característicos de los topes de las laderas.
- Finalmente, el 17,6% restante corresponde a valores bajos o muy bajos, los cuales se asocian a zonas planas o suavemente onduladas, ubicadas particularmente a lo largo de los drenajes principales.

En la Ilustración 40 y en la Tabla 6 se presentan las distribuciones porcentuales de los rangos de rugosidad para el Distrito de Medellín.

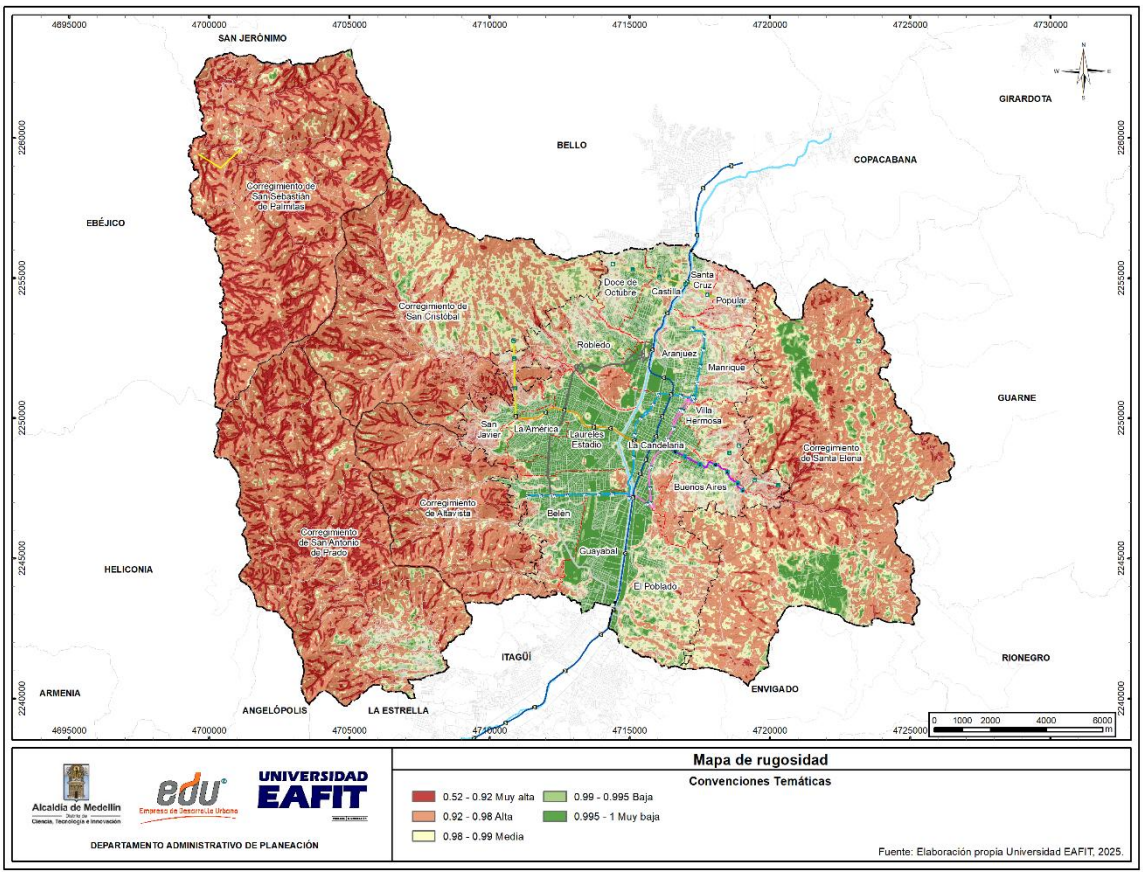


Ilustración 40. Mapa de rugosidad para el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Tabla 6. Distribución de las clases de rugosidad para el Distrito de Medellín

Rango	Clasificación	Área (Ha)	Porcentaje del Territorio
Muy baja	0,995–1,000	4.084,58	10,9
Baja	0,990–0,995	2.532,07	6,7
Media	0,980–0,990	6.070,89	16,1
Alta	0,920–0,980	19.252,57	51,2
Muy alta	0,520–0,920	5.686,32	15,1

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

5.1.3 Curvatura

Esta variable describe el grado de concavidad o convexidad de la superficie del terreno y se calcula a partir del DEM mediante derivadas de segundo orden, las cuales se evalúan en ventadas de 2x2

celdas. Esta medida indica si una celda presenta un cambio positivo (convexo) o negativo (cóncavo) respecto a sus vecinas, reflejando tendencias locales del relieve.

Desde el punto de vista geomorfológico e hidrológico, esta variable se relaciona directamente con la concentración o dispersión del flujo superficial. Las superficies cóncavas tienden a concentrar escorrentía, favoreciendo la saturación del suelo y el aumento de la presión de poros, lo cual incrementa la susceptibilidad a movimientos en masa. En contraste, las zonas convexas favorecen la dispersión del flujo, reduciendo la acumulación del agua superficial; estas características se asocian con espesores delgados de suelo.

En el Distrito de Medellín, la distribución de la curvatura es equilibrada entre zonas muy cóncavas (48,9%) y zonas muy convexas (49,8%), respecto al área total del municipio. Las formas cóncavas predominan hacia las áreas de los drenajes, mientras que las convexas se localizan en las divisoras de aguas y topes de las laderas, donde hay espesores menores de suelo.

La Tabla 7 muestra la clasificación porcentual de esta variable y la Ilustración 41 presenta su distribución espacial a nivel municipal.

Tabla 7. Distribución de las clases de curvatura para el Distrito de Medellín

Rango	Clasificación	Área (Ha)	Porcentaje del Territorio
Muy convexo	<-0,05	18.732,1	49,8
Convexo	-0,05 – -0,02	153,3	0,4
Plano	-0,02 – 0,00	104,8	0,3
Muy plano	0,00 – 0,02	104,8	0,3
Cóncavo	0,02 – 0,05	153,1	0,4
Muy cóncavo	> 0,05	18.391,3	48,9

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

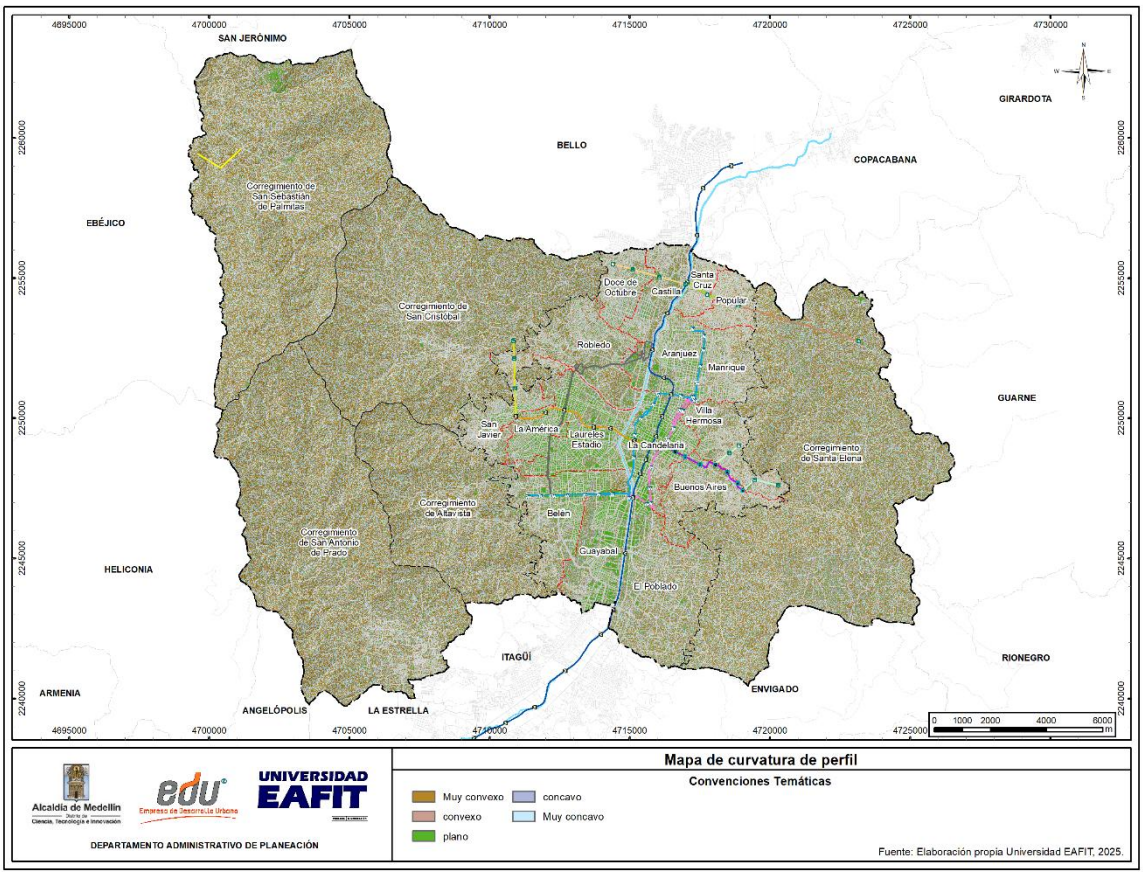


Ilustración 41. Mapa de curvatura para el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

5.1.4 Relieve relativo

El relieve relativo se define como la diferencia de elevación, expresada en metros, entre el punto más alto y el más bajo dentro de una unidad espacial determinada. Esta medida representa la variación topográfica interna de un área, sin hacer referencia a la altitud absoluta sobre el nivel del mar. Su valor está directamente relacionado con la resistencia de los materiales a nivel superficial, ya que los relieves más acentuados pueden estar asociados tanto a zonas altamente erosionadas como a materiales resistentes que desarrollan morfologías con pendientes escarpadas y desniveles muy marcados.

En el Distrito de Medellín predomina un relieve relativamente moderado (20 m–50 m), que abarca el 49,8% del territorio y se distribuye de manera generalizada en todas las zonas del Distrito, con excepción del valle del río Aburrá.

Los valores bajos (10 m–20 m) representan el 20,1% del área y se localizan principalmente en los bordes urbano–rurales del municipio y en el corregimiento de Santa Elena. Por su parte, los valores muy bajos (0 m–10 m), característicos del valle del río Aburrá, corresponden al 15,3% del área total.

El relieve alto (50 m–100 m) cubre el 14,7% del territorio y se distribuye principalmente en la ladera occidental y en sectores de la ladera oriental asociados a pendientes escarpadas y muy abruptas.

Finalmente, las zonas con relieve muy alto (>100 m) son muy localizadas y representan apenas el 0,1% del área municipal.

La Tabla 8 presenta el detalle de las áreas correspondientes a cada rango del índice de relieve relativo, y la Ilustración 42 muestra su distribución espacial.

Tabla 8. Distribución de las clases del índice de relieve relativo para el Distrito de Medellín

Rango	Clasificación (m)	Área (Ha)	Porcentaje del Territorio
Muy bajo	0–10	5.763,9	15,3
Bajo	10–20	7.549,6	20,1
Moderado	20–50	18.764,5	49,9
Alto	50–100	5.544,8	14,7
Muy alto	>100	16,7	0,04

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

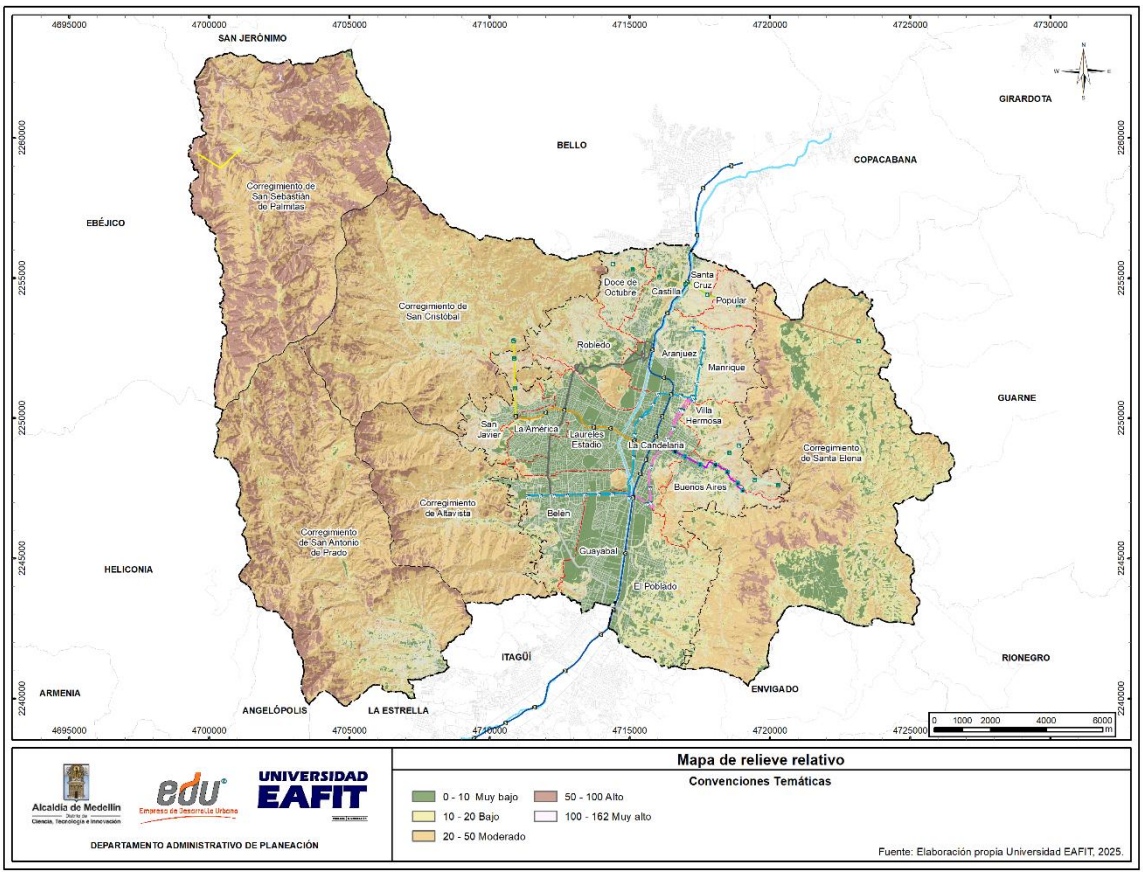


Ilustración 42. Mapa de relieve relativo para el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

5.1.5 Aspecto

Representa la orientación de la pendiente, es decir, la dirección hacia la cual desciende la superficie del terreno, además, refleja la incidencia de factores ambientales como la radiación solar, el viento y la humedad. Esta variable se calcula a partir de las derivadas parciales de la elevación respecto a los ejes X e Y, y su valor se expresa de manera circular, en grados, desde 0° hasta 360° (Dai, Lee, & Xu, 2001).

Cada celda del ráster resultante indica la dirección de la pendiente descendente en términos de rumbo, medida en sentido horario (ver Tabla 9). Las áreas planas, que no presentan una dirección de pendiente definida, se asignan con un valor de -1.

El aspecto del terreno es relevante para el análisis de la amenaza por movimientos en masa, ya que influye en la exposición del terreno a procesos de secado, saturación y degradación diferenciada, según la orientación, lo cual afecta la estabilidad de las laderas.

En la Ilustración 43 se muestra la distribución espacial del aspecto del territorio del Distrito de Medellín.

Tabla 9. Dirección y orientación de las pendientes, en términos del rumbo, de las celdas del ráster

Dirección	Rango en grados
Plano	-1 (sin pendiente)
Norte	337,5° – 22,5°
Noreste	22,5° – 67,5°
Este	67,5° – 112,5°
Sureste	112,5° – 157,5°
Sur	157,5° – 202,5°
Suroeste	202,5° – 247,5°
Oeste	247,5° – 292,5°
Noroeste	292,5° – 337,5°

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

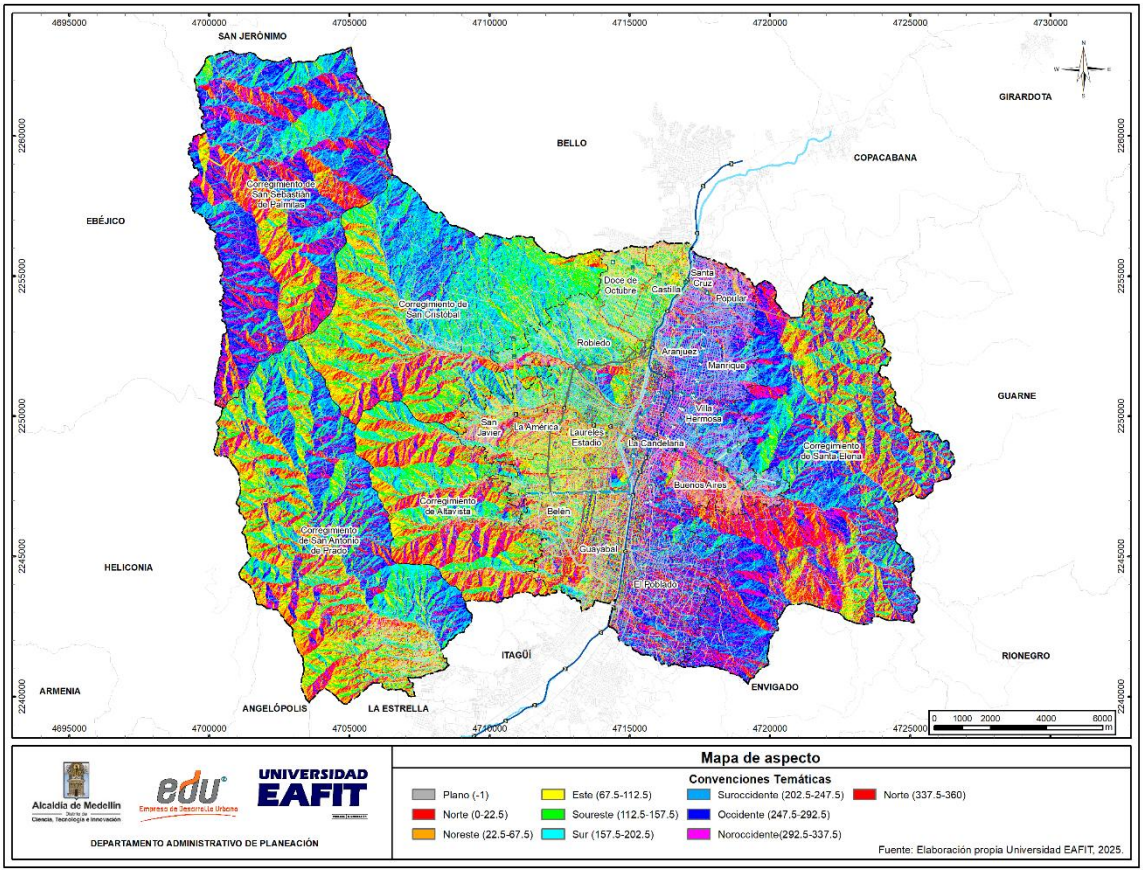


Ilustración 43. Mapa del aspecto del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, *2025*.

5.1.6 Dirección de flujo

La dirección de flujo es una variable morfométrica derivada de un Modelo Digital de Elevación (MDE) que indica la trayectoria que seguiría el agua superficial desde cada celda del terreno según la máxima pendiente descendente. Su análisis permite identificar patrones de drenaje, delimitar cuencas hidrográficas y comprender los procesos de concentración y transporte de la escorrentía superficial.

En el método D8, utilizado comúnmente en ArcGIS, la dirección de flujo se representa mediante los siguientes valores:

Tabla 10. Dirección de flujo, en términos del rumbo, de las celdas del ráster

Valor	Dirección
1	Este (E)
2	Sureste (SE)
4	Sur (S)
8	Suroeste (SO)
16	Oeste (O)
32	Noroeste (NO)
64	Norte (N)
128	Noreste (NE)

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Cuando una celda presenta más de una dirección potencial de salida, como ocurre en superficies planas o zonas con drenaje indeterminado, el valor almacenado corresponde a la suma de las direcciones posibles. Por esta razón, los valores del ráster pueden variar entre 1 y 255, donde los valores básicos representan direcciones únicas de flujo y los valores compuestos representan múltiples direcciones potenciales. Esta codificación permite describir de manera detallada el comportamiento del flujo superficial y su relación con la topografía del terreno.

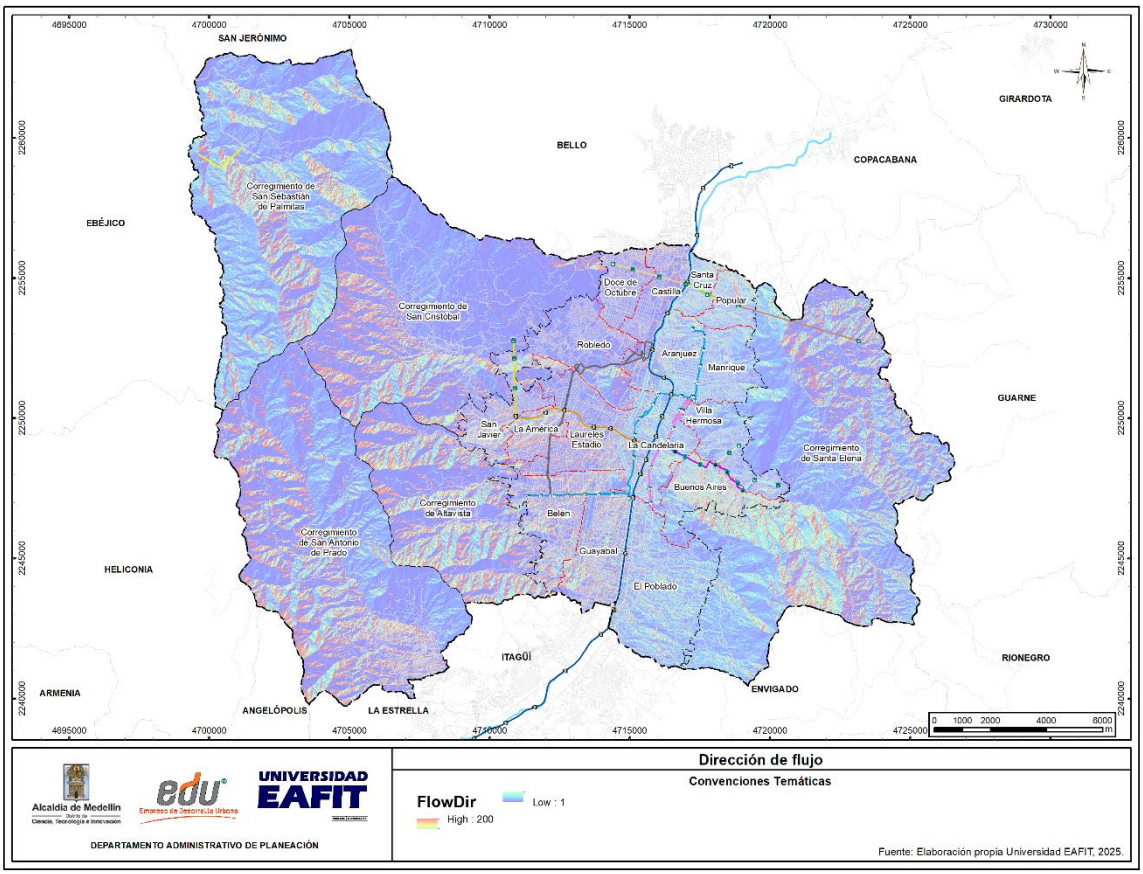


Ilustración 44. Mapa de dirección de flujo para el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT*, 2025*.

5.2 VARIABLES FÍSICO-ESPACIALES

5.2.1 Distancia drenajes

Esta variable está relacionada con la inestabilidad generada por los drenajes, los cuales según Escobar y Duque (2017), originan movimientos en masa en las laderas por su capacidad de infiltración (generando un peso en el terreno), por la profundización en el fondo de los cauces (eliminado el soporte en la base de las laderas) y por la erosión en las orillas (desestabilizando el terreno), por lo que se realiza una evaluación de las distancias a estos.

En el Distrito de Medellín esta variable muestra la distancia a los principales drenajes que recorren la zona rural y urbana, las cuales muestran una importante densidad en la vertiente occidental del Valle, especialmente en los corregimientos de San Antonio de Prado, San Cristóbal y San Sebastián de Palmitas; y en la vertiente oriental se destaca una mayor densidad asociada a la zona de altiplano en

el corregimiento de Santa Elena; en la Tabla 11 se muestra la distribución de la variable y en la Ilustración 45 se presenta el mapa de distancia drenajes del Distrito de Medellín.

Tabla 11. Distribución de la variable distancia drenajes para el Distrito de Medellín.

Rango de Distancia	Área (ha)	Porcentaje (%)
0 - 20 m	8223,78	21,85%
20 - 40 m	7223,38	19,19%
40 - 100 m	13789,50	36,64%
100 - 350 m	8059,54	21,41%
>350 m	343,46	0,91%

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

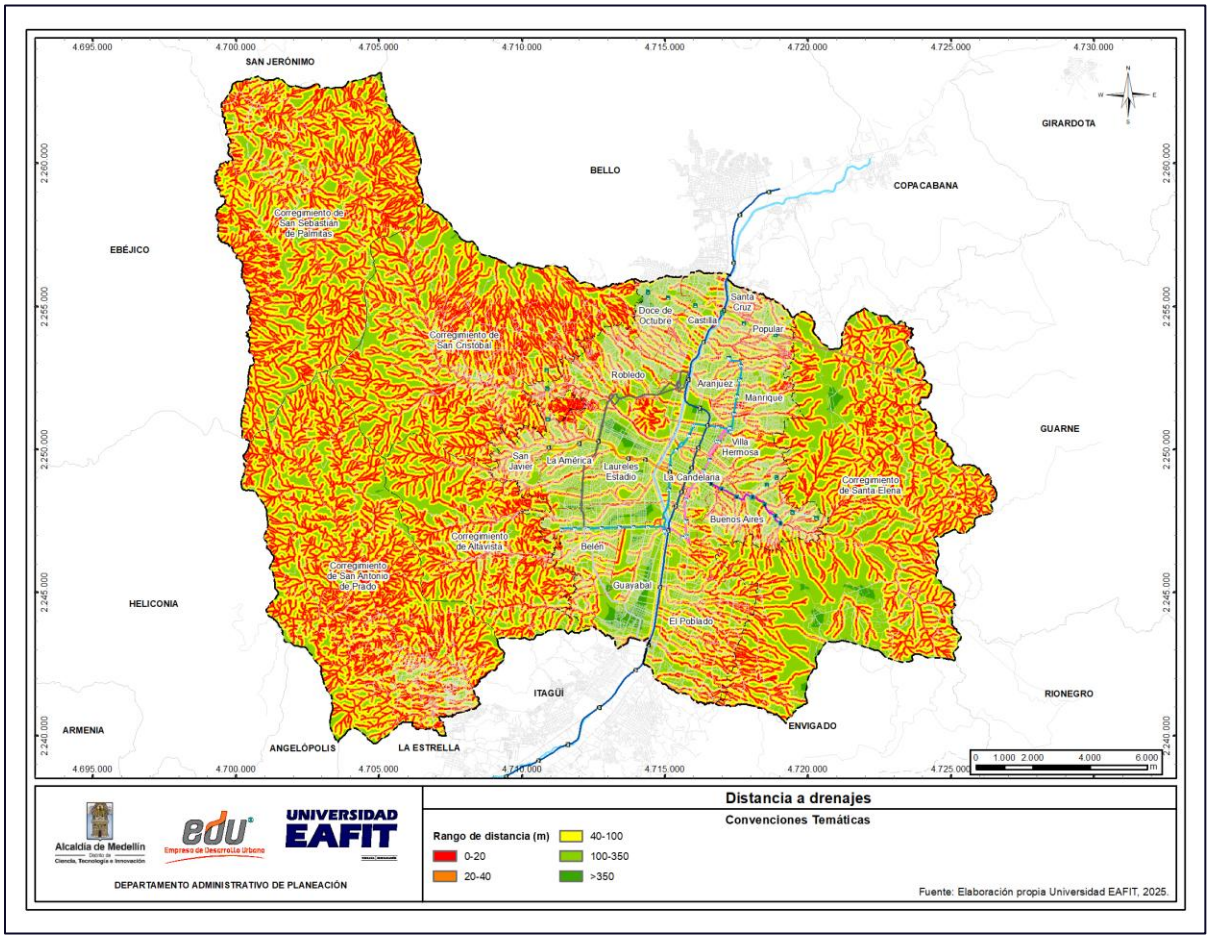


Ilustración 45. Mapa de variable distancia drenajes para el Distrito de Medellín.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

5.2.2 Distancia fallas

Esta variable está relacionada con la inestabilidad generada por la presencia de fallas. En el Distrito de Medellín esta variable muestra la distancia a las fallas que se presentan a lo largo de todo el Distrito, en general con dirección SSE-NNE, las cuales muestran una importante densidad en la zona occidental del área municipal, en este sector se destacan las fallas de Ebéjico, Cauca-Romeral y San Jerónimo. La mayor densidad observada se presenta en los corregimientos de San Antonio de Prado, San Cristóbal, San Sebastián de Palmitas y Santa Elena, en la Ilustración 46 se presenta el mapa de distancia fallas del Distrito de Medellín y en la Tabla 12 se observa la distribución en porcentajes de los diferentes rangos de distancias.

Tabla 12. Distribución de la variable distancia fallas para el Distrito de Medellín.

Rango de Distancias	Área (ha)	Porcentajes (%)
0 - 20 m	1403,52	3,73%
20 - 40 m	1342,32	3,57%
40 - 100 m	3583,31	9,52%
100 - 350 m	10282,98	27,32%
>350 m	21027,54	55,87%

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

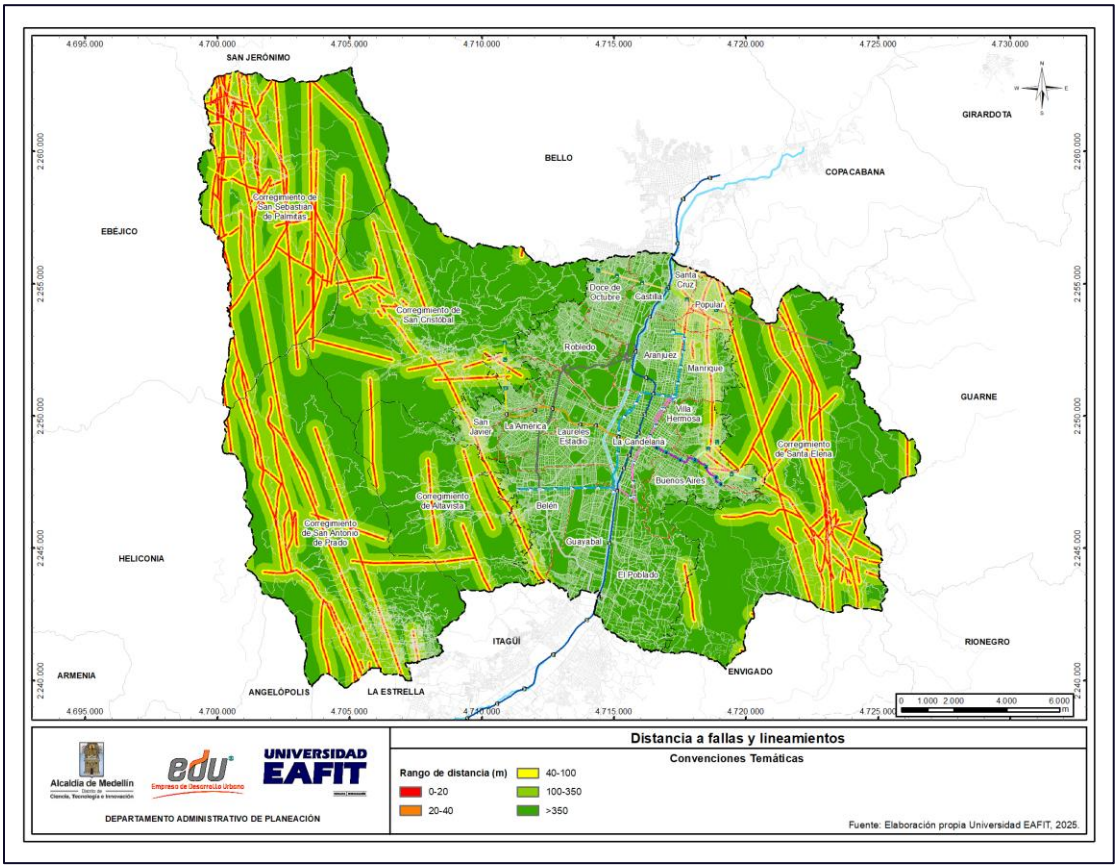


Ilustración 46 Mapa de variable distancia a fallas para el Distrito de Medellín.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

5.2.3 Distancia vías

Esta variable está relacionada con la inestabilidad generada por la construcción de proyectos lineales como vías, los cuales generan cambios en las condiciones iniciales de la topografía, como cortes y llenos que pueden desencadenar procesos de remoción en masa, por lo cual se realiza una evaluación de las distancias a estas intervenciones en franjas, las cuales marcan una determinada influencia de estos procesos en la estabilidad de la zona.

En el Distrito de Medellín esta variable muestra la distancia a las principales vías que recorren la zona urbana y rural, por la alta densidad de vías en la zona urbana sólo se toman las vías principales. En la Tabla 13 se muestra la distribución de la variable y en la Ilustración 47 se presenta el mapa de distancia vías de la zona rural del Distrito de Medellín.

Tabla 13. Distribución de la variable distancia vías para el Distrito de Medellín.

Rango de Distancia	Área (ha)	Porcentaje (%)
0 - 20 m	4268,30	11,34%
20 - 40 m	3679,80	9,78%
40 - 100 m	7902,14	20,99%
100 - 350 m	12246,64	32,54%
>350 m	9542,78	25,35%

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

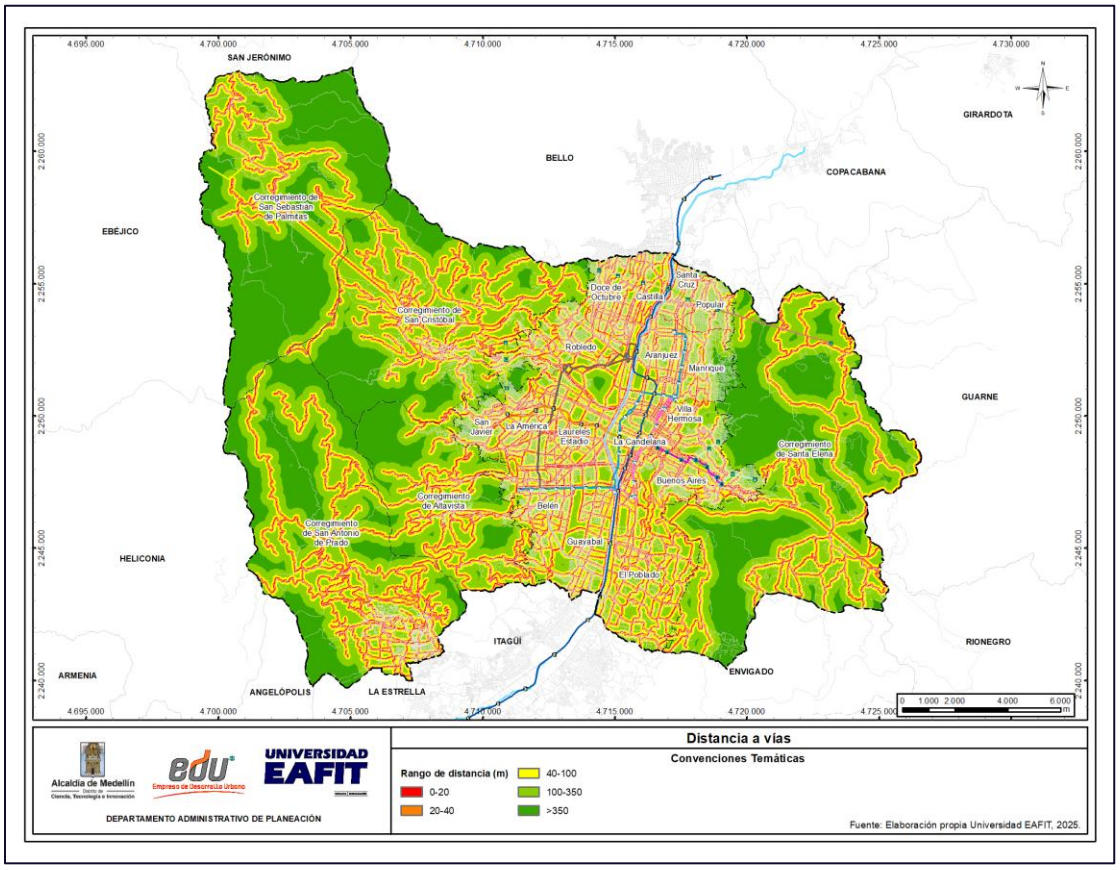


Ilustración 47. Mapa de variable distancia a vías para el Distrito de Medellín.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

5.2.4 Coberturas vegetales

Para obtener las coberturas terrestres del Distrito, se utiliza como insumo principal el *feature class* “CoberturaTierra_UsoActual” de la geodatabase del POMCA del río Aburrá 2018. Luego mediante procesamiento geográfico (UNION) realizado en el software ArcGis v. 10.8, se incorporan las

coberturas terrestres suministradas por planeación para los corregimientos de San Sebastián de Palmitas y San Antonio de Prado. Finalmente, se realiza una edición de coberturas de todo el distrito, utilizando la ortofoto para el Distrito de Medellín del año 2024 disponible en el servidor de mapas del Distrito, ajustando las zonas que han venido ocupándose con la categoría de tejido urbano discontinuo y continuo. En la Ilustración 48 se presenta la distribución de las coberturas en el Distrito de Medellín.

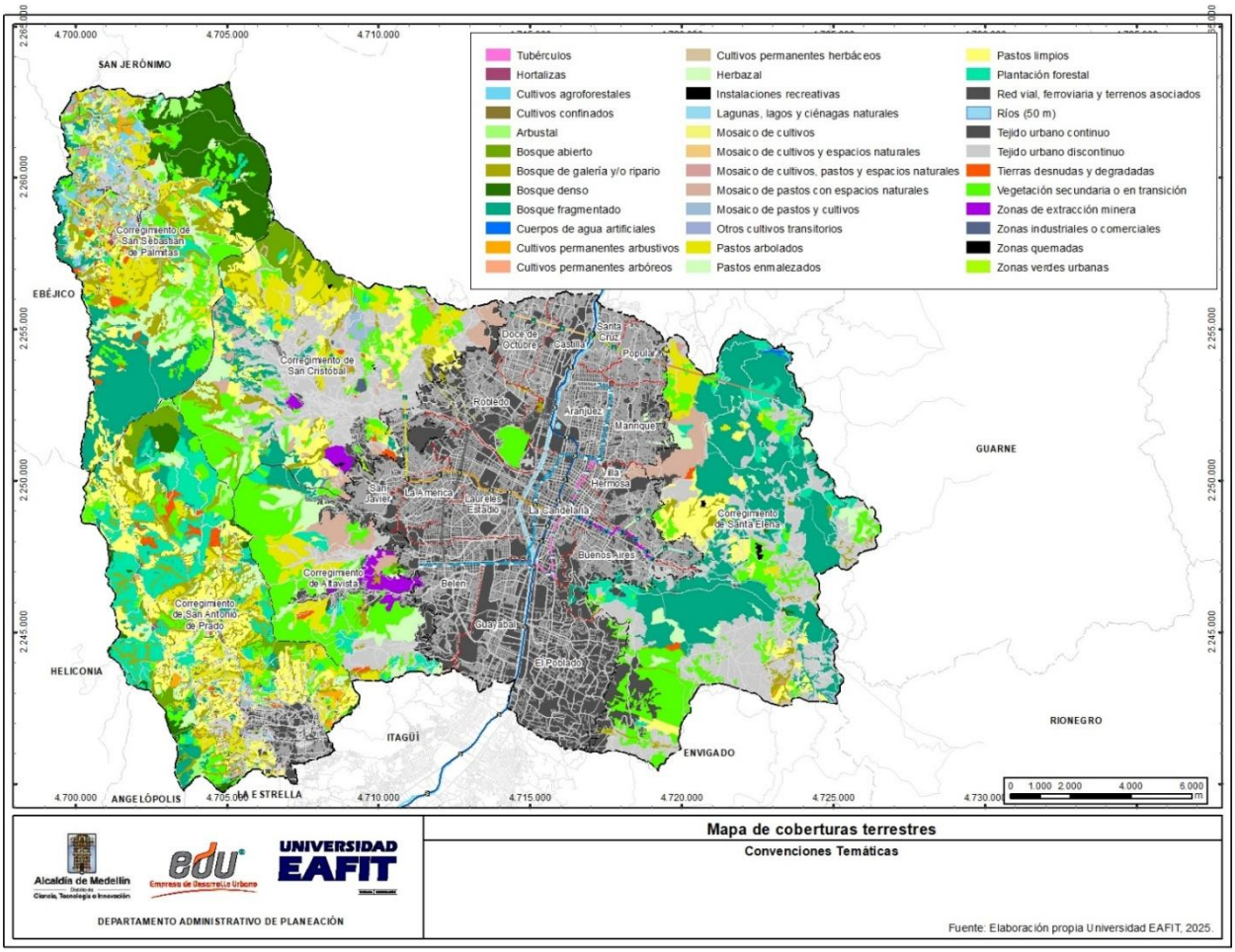


Ilustración 48. Mapa de Coberturas

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

6 MORFODINÁMICA

La construcción de un inventario de procesos morfodinámicos es crucial para el desarrollo de los modelos de susceptibilidad por movimientos en masa utilizados en el presente estudio, pues esta es llamada la variable dependiente y es la que condiciona el entrenamiento del modelo para que este pueda definir qué categorías de cada variable tienen mayor área afectada por deslizamientos y por lo tanto es más susceptible a la ocurrencia de los mismos, mientras que las variables condicionantes pueden variar según el estudio o análisis exploratorio de variables, esta es una constante para cualquier modelo de susceptibilidad.

Para esta construcción, se recopila el reporte de eventos históricos tanto de movimientos en masa como procesos erosivos registrados en diferentes bases de datos a nivel nacional, departamental y municipal como:

- Información secundaria: Distrito de Medellín, reportes Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres (DAGRD)- Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), Estudios geológico -geotécnicos, Estudios a detalle y demás estudios que se hayan realizado en el municipio.
- Información primaria: Obtenida a partir de fotointerpretación Es importante resaltar que en algunos casos los eventos se repiten, por lo cual solo se conserva uno de los reportes para evitar duplicidad en la información.

Estas bases de información se presentan en diferentes formatos como puntos y líneas; en la Tabla 14, Tabla 15, Ilustración 49 e Ilustración 50 se presentan las fuentes utilizadas.

De igual manera, se realizó la fotointerpretación con base en imágenes satelitales históricas de Google Earth, ortofotomosaicos y material aerofotográfico disponible en los servidores institucionales del Distrito y las ortofotos del 2025 suministradas por el DAGRD. El propósito de este análisis fue la identificación, caracterización y clasificación de eventos morfodinámicos, principalmente asociados a movimientos en masa. Para cada evento identificado se registró el mecanismo del proceso (deslizamiento, flujo, reptación, caídas, entre otros), el tipo de deslizamientos (rotacionales, planares o indeterminados, según lo permitiera la calidad de la imagen), el grado de actividad (activo o inactivo), la fuente de información utilizada, el año de la imagen empleada como referencia, y para los eventos ocurridos durante la ~~ola invernal~~ época de lluvias del primer semestre del año 2025 y los cuales tienen ortofotos del DAGRD, se identificó la porción del fenómeno visible (escarpe o cuerpo).

Tabla 14. Fuentes de información

Fuente	Formato	No eventos	%
DAP-Distrito de Medellín	Línea	6.411	75,67%
DAGRD -SIATA	Punto	1.345	15,88%
Estudios de detalle	Línea	605	7,14%

Fuente	Formato	No eventos	%
Estudios Geológico - geotécnico	Punto	111	1,31%
Total general		**8.472**	**100,00%**

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 15. Fuentes de información para la fotointerpretación

Fuente	Tipo de insumo	Cobertura temporal	Aplicación
Distrito de Medellín (Servidor)	Ortofotos	2011, 2013, 2018, 2021, 2024, 2025	Fotointerpretación y análisis multitemporal
DAGRD	Registros y reportes asociados a eventos	2008, 2018, 2019, 2021, 2022, 2025	Identificación detallada de procesos
Google (Google Earth – Maps)	Imágenes satelitales e históricas	2005, 2006, 2008, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2018, 2019, 2020, 2021, 2023, 2024	Fotointerpretación multitemporal
DAGRD – SIATA	Ortomosaico post-evento en Altavista	02/05/2025	Delimitación detallada de movimientos emergencia de 2025
	Ortomosaico post-evento en Los Balsos	07/05/2025	
	Ortomosaico post-evento en Santa Rita	08/05/2025	
	Ortomosaico post-evento en Villatina	22/05/2025	
	Ortomosaico post-evento en La limona Parte Alta y Baja, Manzanillo	23/05/2025	
	Ortomosaico post-evento en Altavista	27/052025	
	Ortomosaico post-evento en El Rodeo, Golondrinas, Corazón	28/05/2025	
	Ortomosaico post-evento en María Cano - Carambolas	19/06/2025	

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

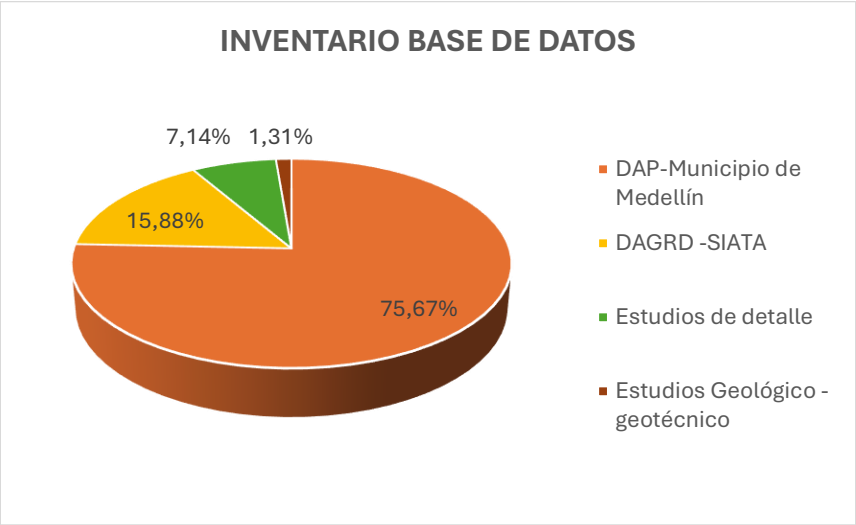


Ilustración 49. Inventarios de procesos morfodinámicos

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

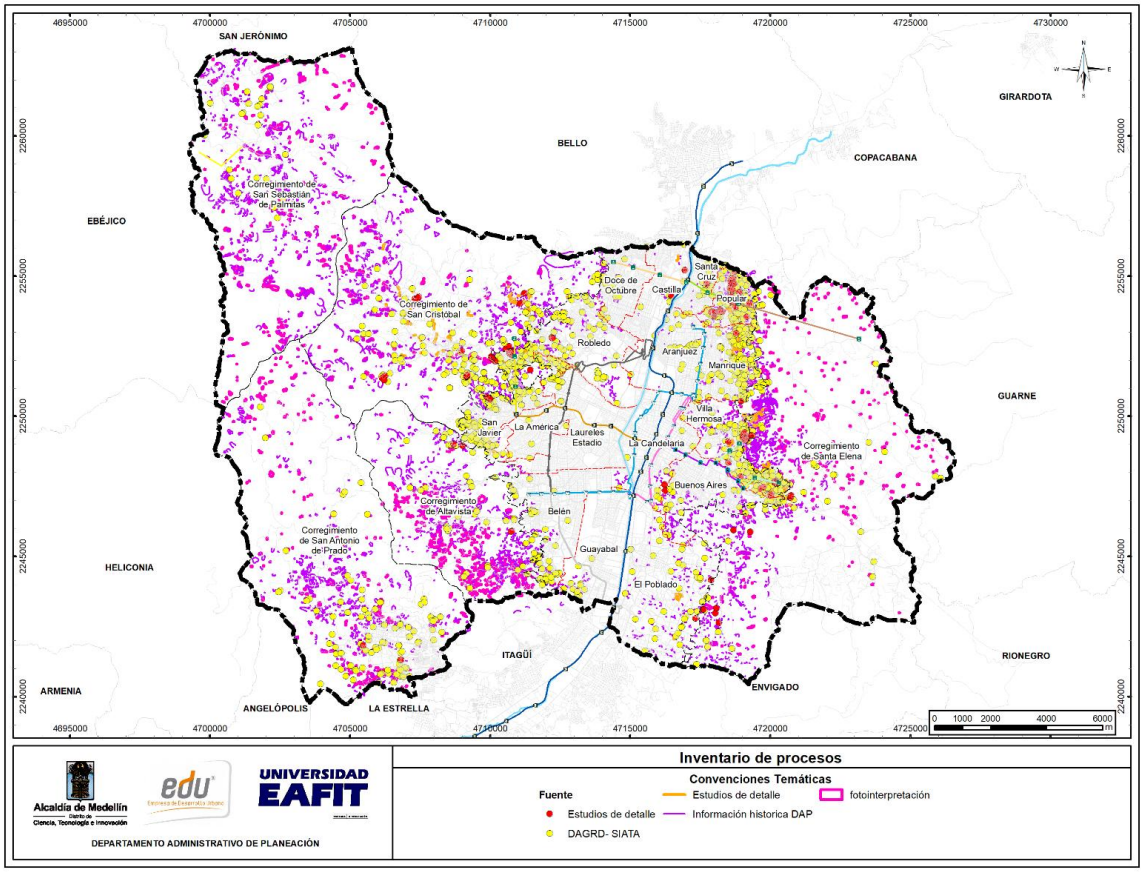


Ilustración 50. Mapa reportes de eventos según la fuente

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

En la base de datos suministrada por el SIATA, la cual recopila información de eventos del DAGRD, se reportan 1345 eventos, de los cuales el 89,36% corresponden a deslizamientos (deslizamientos, deslizamiento traslacional, deslizamientos complejos); el 4,16% a flujos y el 6,47% a caídas de roca y otros eventos sin especificar (Tabla 16, Ilustración 51 e Ilustración 52).

Tabla 16. Eventos base de datos DAGRD - SIATA

Tipo de proceso	No. de eventos	%
Caída de rocas	29	2,156%
Complejo	28	2,082%
Deslizamiento	1173	87,212%
Deslizamiento traslacional	1	0,074%
Flujo	56	4,164%
Otro	58	4,312%
Total general	**1345**	**100%**

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

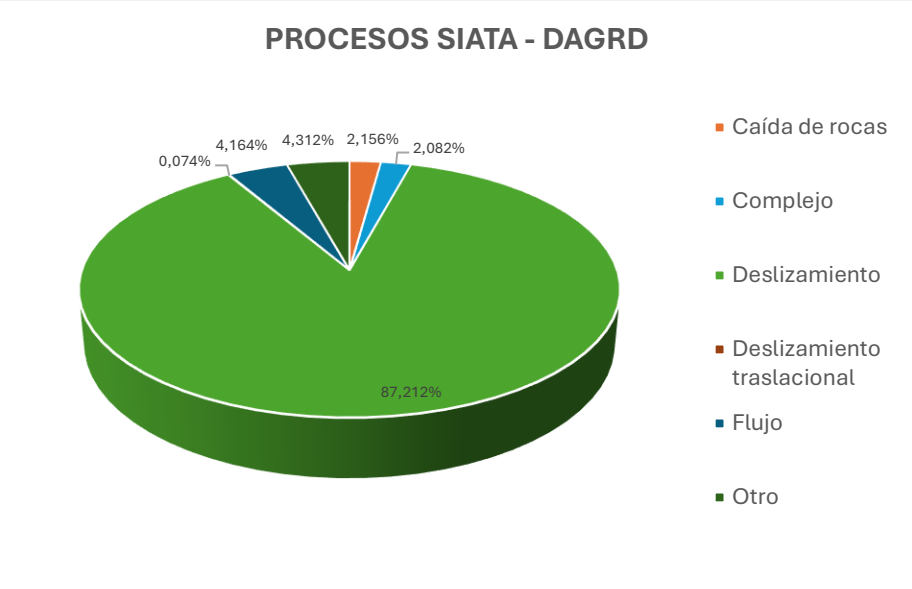


Ilustración 51. Reportes de eventos según SIATA - DAGRD

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

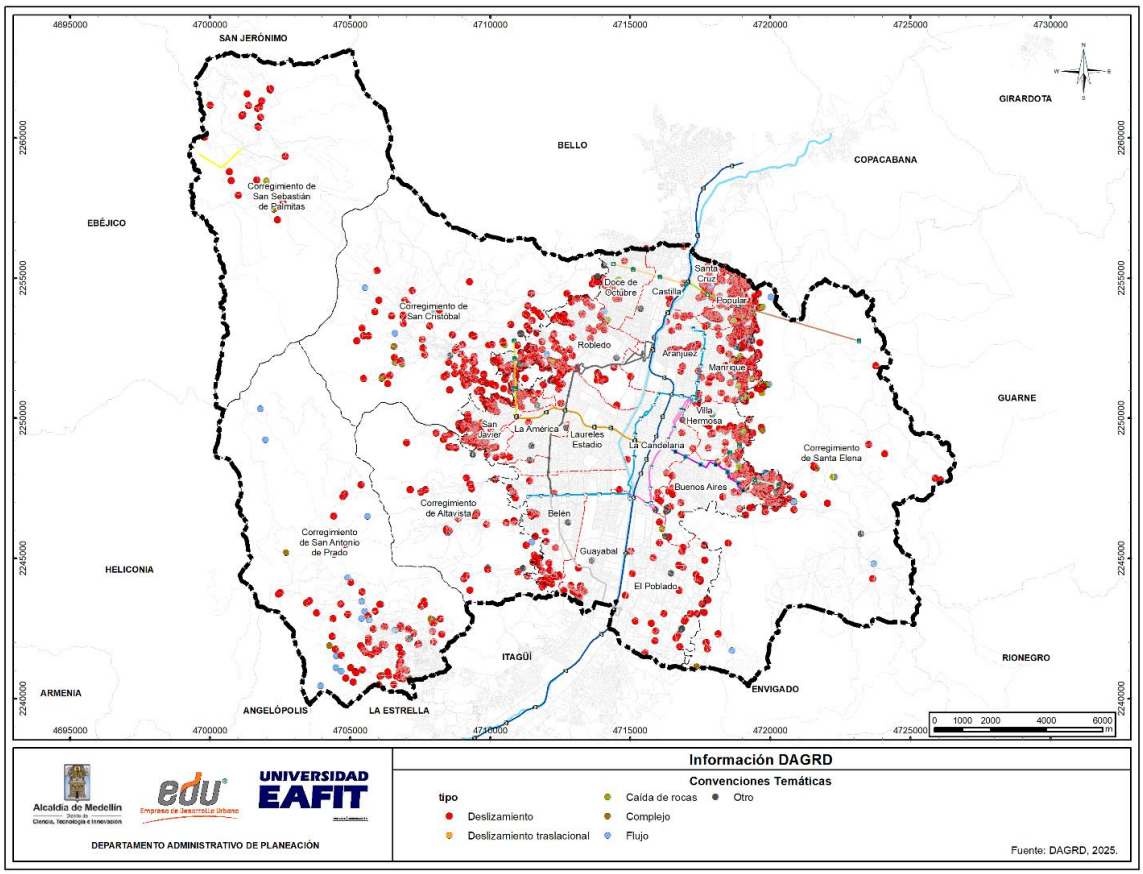


Ilustración 52. Mapa reportes de eventos según SIATA - DAGRD

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Adicional a los reportes anteriores, se incluyeron los procesos morfodinámicos identificados en los diferentes estudios técnicos desarrollados; se identificaron 111 eventos en estudios geológico-geotécnicos y 605 eventos en estudios de detalle desarrollados para el Distrito de Medellín.

En los estudios geológico – geotécnicos el 81,98% corresponde a eventos tipo deslizamientos (deslizamientos, deslizamiento complejo, deslizamiento rotacional, deslizamiento superficial, deslizamiento traslacional) y movimientos en masa, el 9,01% a cicatrices de deslizamientos y el 9% a procesos de menor recurrencia como cárcavas, flujos de lodos, reptación y desgarres superficiales (Tabla 17, Ilustración 53 e Ilustración 54).

Tabla 17. Base de datos de estudios geológico geotécnico - DAGRD

Tipo de proceso	No. de eventos	%
Cárcava	4	3,60%
Cicatriz de deslizamiento	10	9,01%
Corona de deslizamiento	2	1,80%

Tipo de proceso	No. de eventos	%
Desgarre superficial	2	1,80%
Deslizamiento	6	5,41%
Deslizamiento Complejo	3	2,70%
Deslizamiento Rotacional	15	13,51%
Deslizamiento superficial	3	2,70%
Deslizamiento Traslacional	6	5,41%
Flujo de lodos y escombros	1	0,90%
Movimiento en masa	58	52,25%
Reptación	1	0,90%
Total general	**111**	**100%**

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

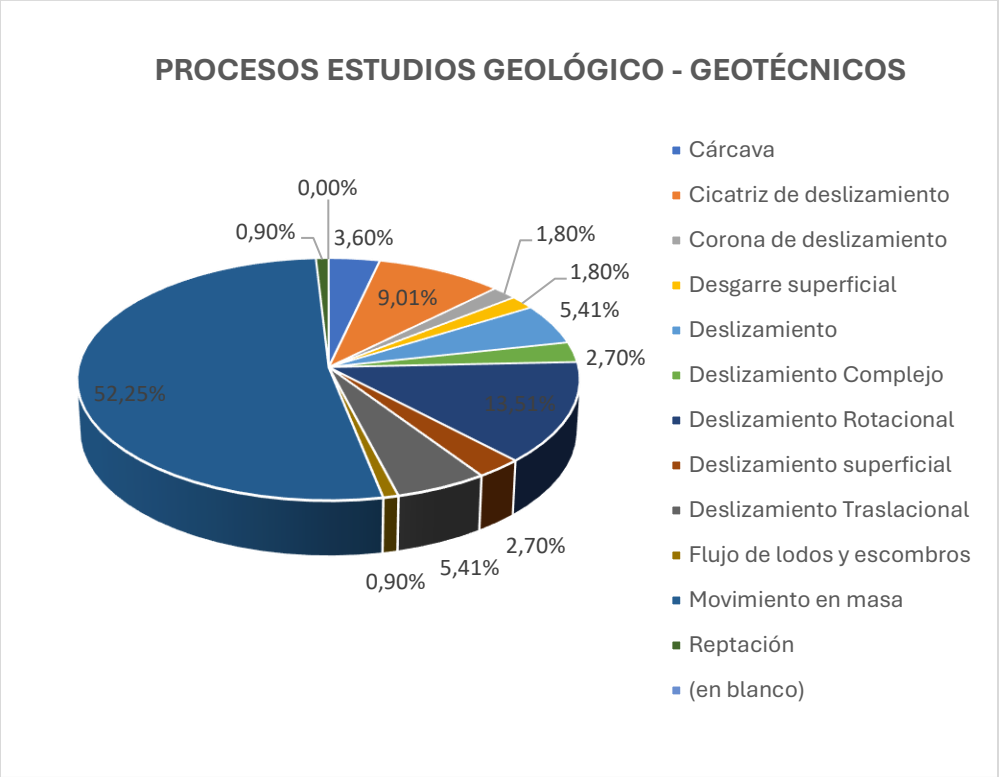


Ilustración 53. Eventos estudios geológico geotécnico

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

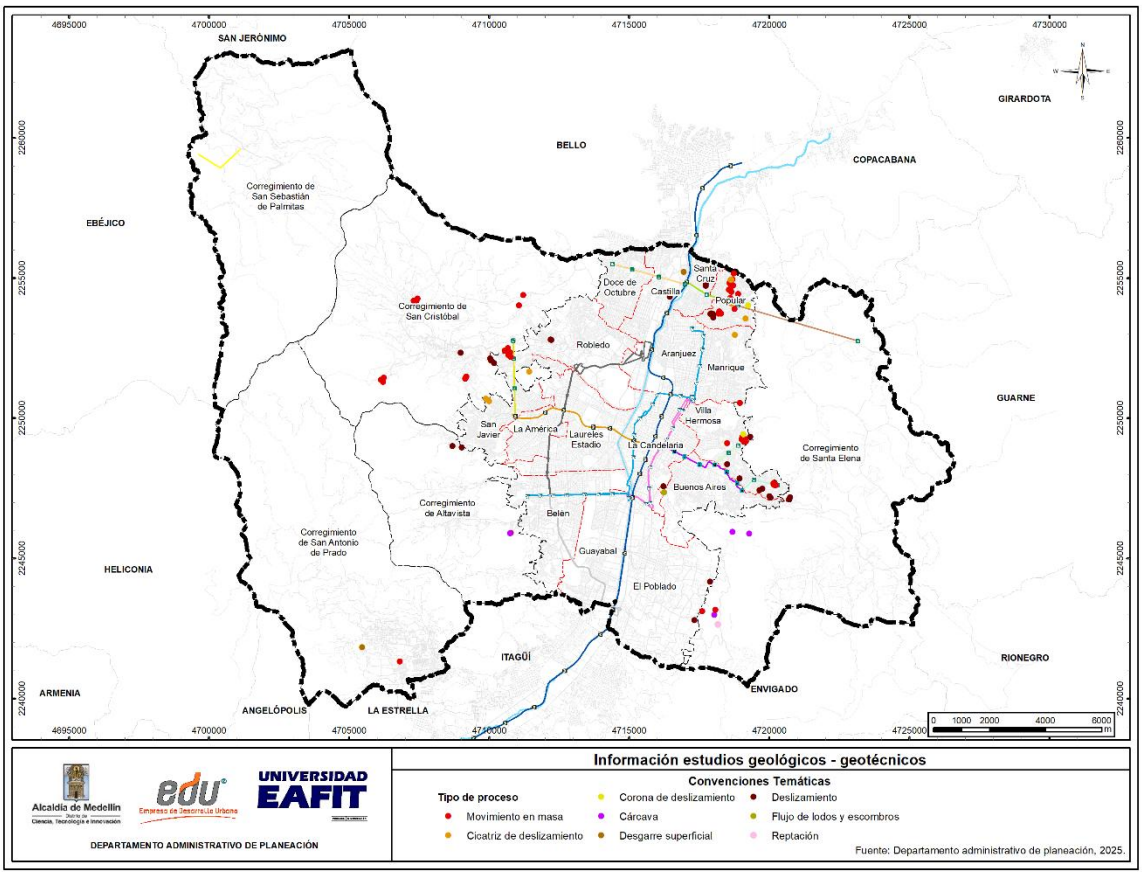


Ilustración 54. Mapa de eventos de estudios geológico geotécnico

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

En los estudios a detalle revisados se reportaron 605 procesos morfodinámicos, de los cuales el 45,95% corresponden a cicatrices de movimientos en masa, el 44,79% a movimientos en masa activos y/o reciente, el 7,11% a procesos de socavación lateral y el 2,14% corresponden a escarpes erosivos, coronas de deslizamiento y movimientos en masa inactivos (Tabla 18, Ilustración 55 e Ilustración 56).

Tabla 18. Base de datos estudios de detalle, Distrito de Medellín

Tipo de proceso	No. de eventos	%
Cicatriz de movimiento en masa	278	45,95%
Corona de deslizamiento	4	0,66%
Escarpe erosivo	2	0,33%
Movimiento en masa activo y/o reciente	271	44,79%
Movimiento en masa inactivo	7	1,16%
Socavación lateral	43	7,11%
Total general	**605**	**100,00%**

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

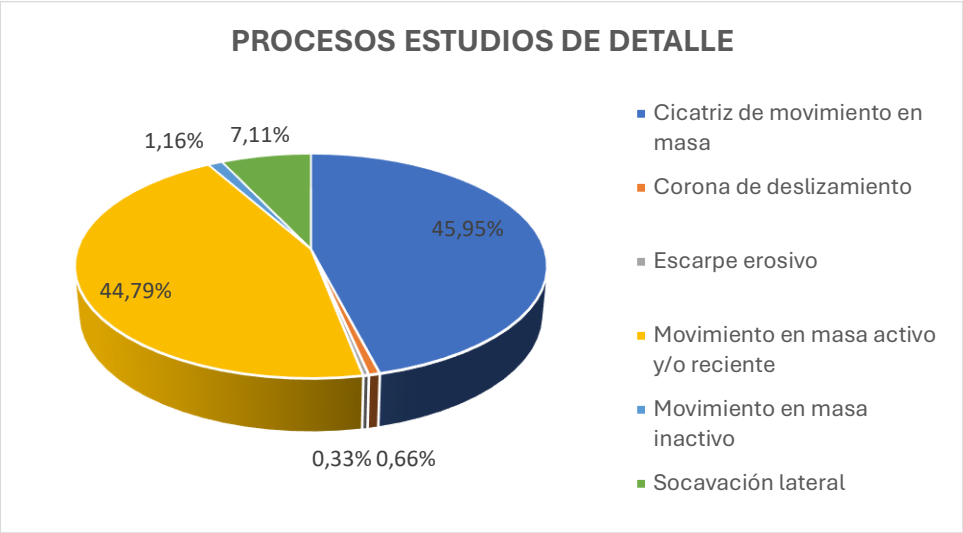


Ilustración 55. Eventos estudios de detalle

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

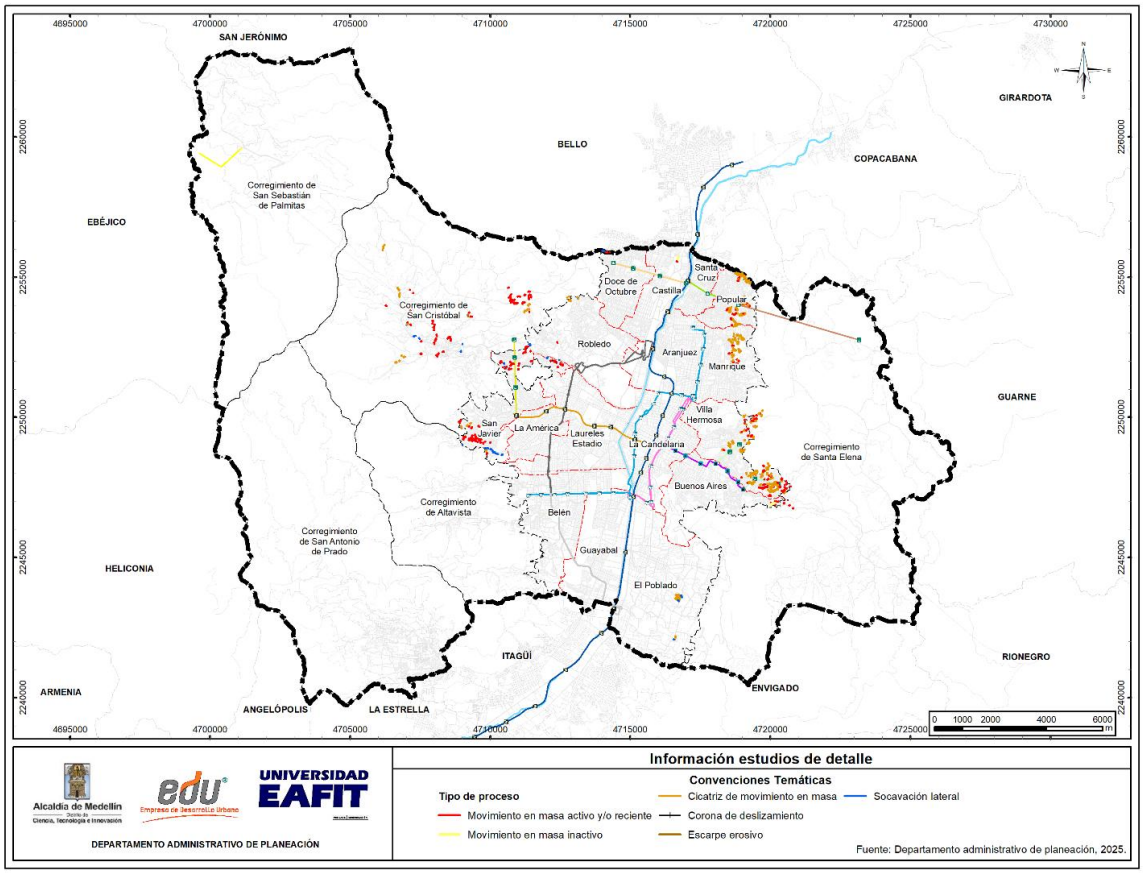


Ilustración 56. Mapa de eventos - estudios de detalle

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Según la información recopilada a través de la fotointerpretación, se identificaron alrededor de 1.748 procesos morfodinámicos, de los cuales el 75,92% corresponde a eventos tipo deslizamientos, el 22,71% a flujos y el 1,37% a procesos de menor recurrencia como reptación (Tabla 19 e Ilustración 57).

Esta clasificación se realizó de acuerdo con las siguientes definiciones.

Un deslizamiento es un movimiento de material pendiente abajo que ocurre a lo largo de una superficie de ruptura o deslizamiento característica. Esta superficie suele ser más profunda que la de otros tipos de deslizamientos y no está controlada estructuralmente. Estos deslizamientos se caracterizan por una escarpa principal prominente y una plataforma o bloque inclinado hacia atrás en la parte superior, con deformación interna limitada. Por debajo de esta, el movimiento es más o menos rotacional alrededor de un eje.

Los deslizamientos se caracterizan por una falla de material en profundidad y su posterior movimiento por deslizamiento a lo largo de una superficie de ruptura o deslizamiento. Existen dos tipos de falla por deslizamiento: los deslizamientos rotacionales (desplomes) y los deslizamientos traslacionales (planares) (Cruden D. M. y D. J. Varnes (1996)).

Los flujos de lodo son deslizamientos de tierra que implican el movimiento de material pendiente abajo en forma de fluido. Suelen dejar tras de sí un depósito característico en forma de embudo invertido donde el material se detiene. Existen diferentes tipos de flujos: de lodo, de escombros y de rocas (avalanchas de rocas).

Los flujos de lodo a menudo están asociados con deslizamientos de tierra complejos de mayor envergadura, mientras que los flujos de escombros pueden ser muy rápidos y suelen producirse en pendientes pronunciadas (Cruden D. M. y D. J. Varnes (1996)).

La reptación de suelos consiste en el desplazamiento lento y gradual de la capa superficial del suelo. Este movimiento se produce debido a factores como la gravedad, la presencia de agua, las variaciones térmicas y las características inherentes del terreno, las reptaciones de suelos pueden pasar desapercibidas durante largos periodos, pero sus efectos acumulativos resultan dañinos para las estructuras (Cruden D. M. y D. J. Varnes (1996)).

Tabla 19. Base de datos eventos fotointerpretación

Tipo de proceso	No. eventos	%
Deslizamiento	1.327	75,92%
Flujo	397	22,71%
Reptación	24	1,37%
Total general	**1.748**	**100%**

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

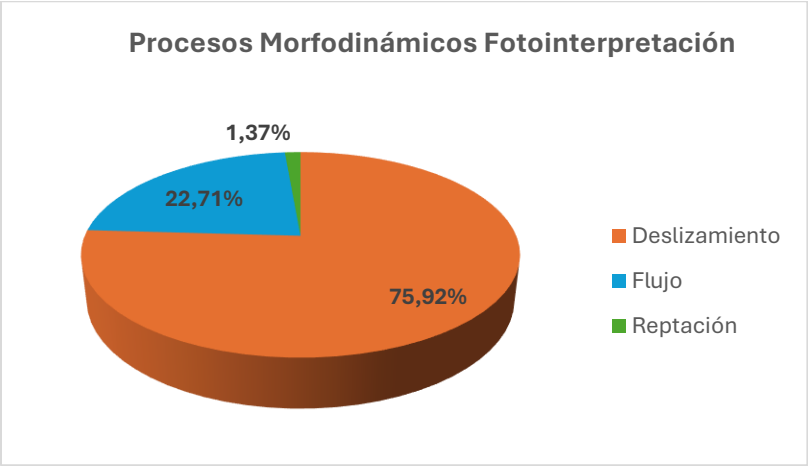


Ilustración 57. Eventos fotointerpretación

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Por otro lado, de los 1.748 procesos morfodinámicos reportados, 1.278 corresponden a procesos activos, lo que representa el 73,11% del total de eventos, mientras que los 470 restantes han sido clasificados como inactivos, equivalentes al 26,89%. Esta distribución evidencia la predominancia de procesos con actividad reciente o en curso, permitiendo una representación diferenciada según el grado de actividad observado (Tabla 20, Ilustración 58 e Ilustración 59).

Tabla 20. Base de datos según grado de actividad fotointerpretación

Grado de actividad	No eventos	%
Activo	1.278	73,11%
Inactivo	470	26,89%
Total general	**1.748**	**100%**

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.



Ilustración 58. Grado de actividad de eventos fotointerpretación.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

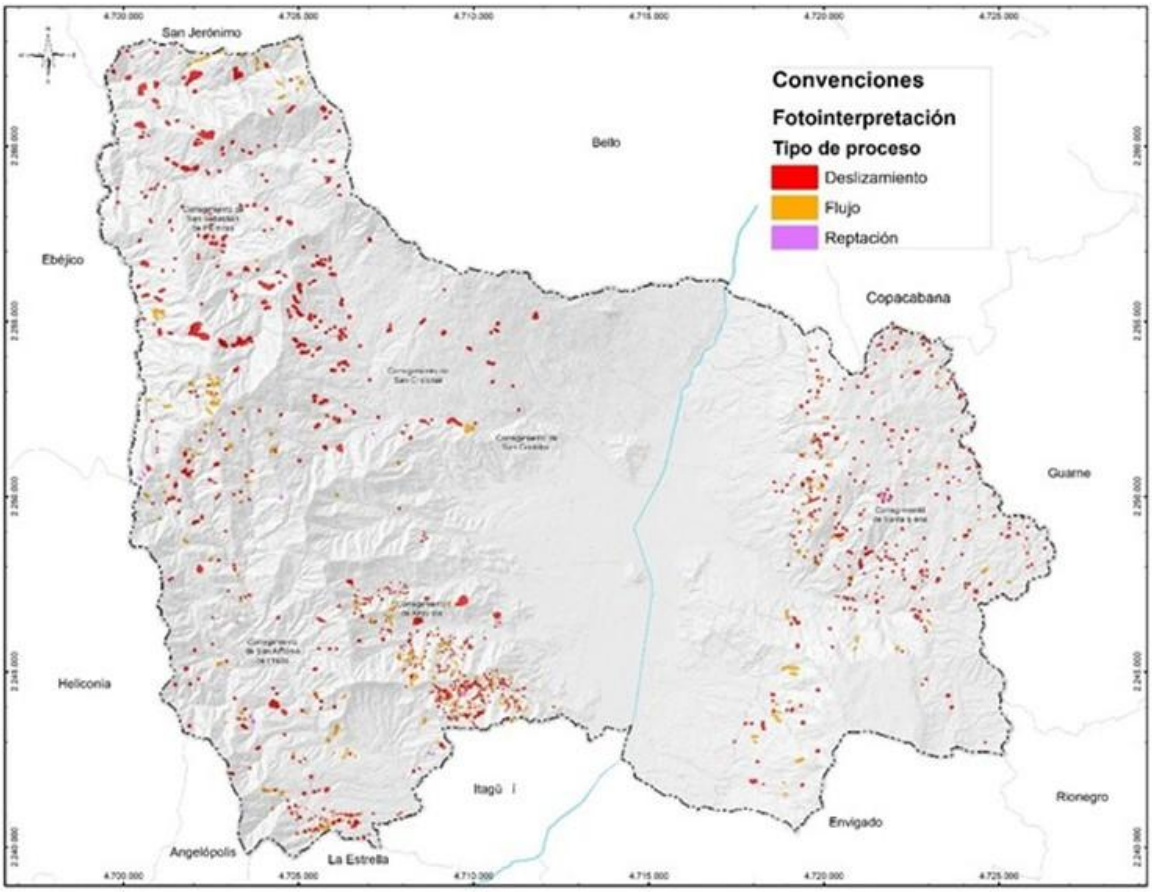


Ilustración 59. Mapa de eventos – fotointerpretación

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

PROCESOS MORFODINÁMICOS RECIENTES

Con el propósito de fortalecer el inventario de procesos morfodinámicos y actualizar la información disponible para el distrito de Medellín, se realizó un ejercicio adicional de fotointerpretación con base en ortomosaicos suministrados por el Departamento Administrativo de Planeación -DAP. Estos insumos fueron generados por el equipo de teledetección del SIATA a solicitud del DAGRD, en el marco de las acciones de respuesta ante emergencias recientes en distintas zonas de la ciudad.

A partir de este material, se llevó a cabo un proceso detallado de fotointerpretación que permitió identificar y delimitar eventos recientes, los cuales fueron clasificados principalmente como deslizamientos o flujos. Para cada evento se registró su tipología, ubicación y área de afectación. Las zonas analizadas fueron: Manzanillo, Altavista La Perla, Altavista La Esperanza, La Limona Parte Baja, Altavista Parte Alta Estadero Los Krisnas, Barrio El Rodeo, Altavista Mano de Dios, Los Balsos, Altavista Aguas Frías, La Limona Parte Alta, Santa Rita, Villa Hermosa Golondrinas, Barrio Corazón, Villatina, Barrio María Cano – Carambolas, Piedras Blancas – Matasano.

Eventos recientes identificados

Se realizó la identificación detallada de los eventos morfodinámicos identificados mediante fotointerpretación, discriminando por tipología (deslizamientos y flujos) y por las zonas donde se realizaron los sobrevuelos con dron. Los resultados de esta caracterización se presentan a continuación (Ilustración 60 a Ilustración 63):

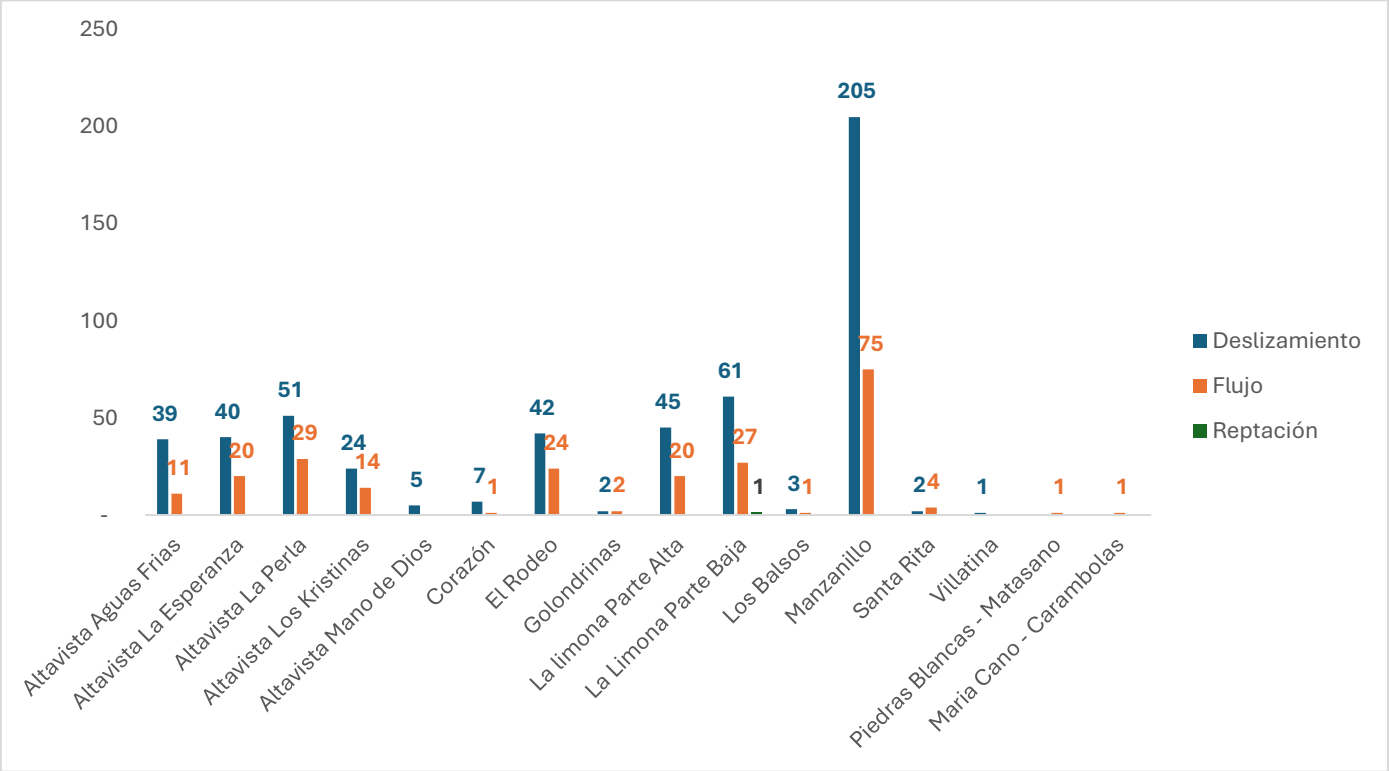


Ilustración 60. Zonas recientes afectadas por tipo de evento y lugar de ocurrencia.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Según la información proporcionada El Manzanillo concentra el mayor número de procesos, con 280 eventos registrados, seguido por La Limona Parte Baja con 89, Altavista la perla con 80, barrio El Rodeo con 66, La Limona Parte Alta con 65, y Altavista La Esperanza con 60. En total se presentaron 758 eventos de los cuales 527 corresponden a deslizamientos, 230 a flujos y 1 de reptación.

Áreas afectadas

El análisis permitió la delimitación de 758 polígonos correspondientes a procesos morfodinámicos. La distribución del área afectada por sector se presenta en el siguiente histograma (Ilustración 61):

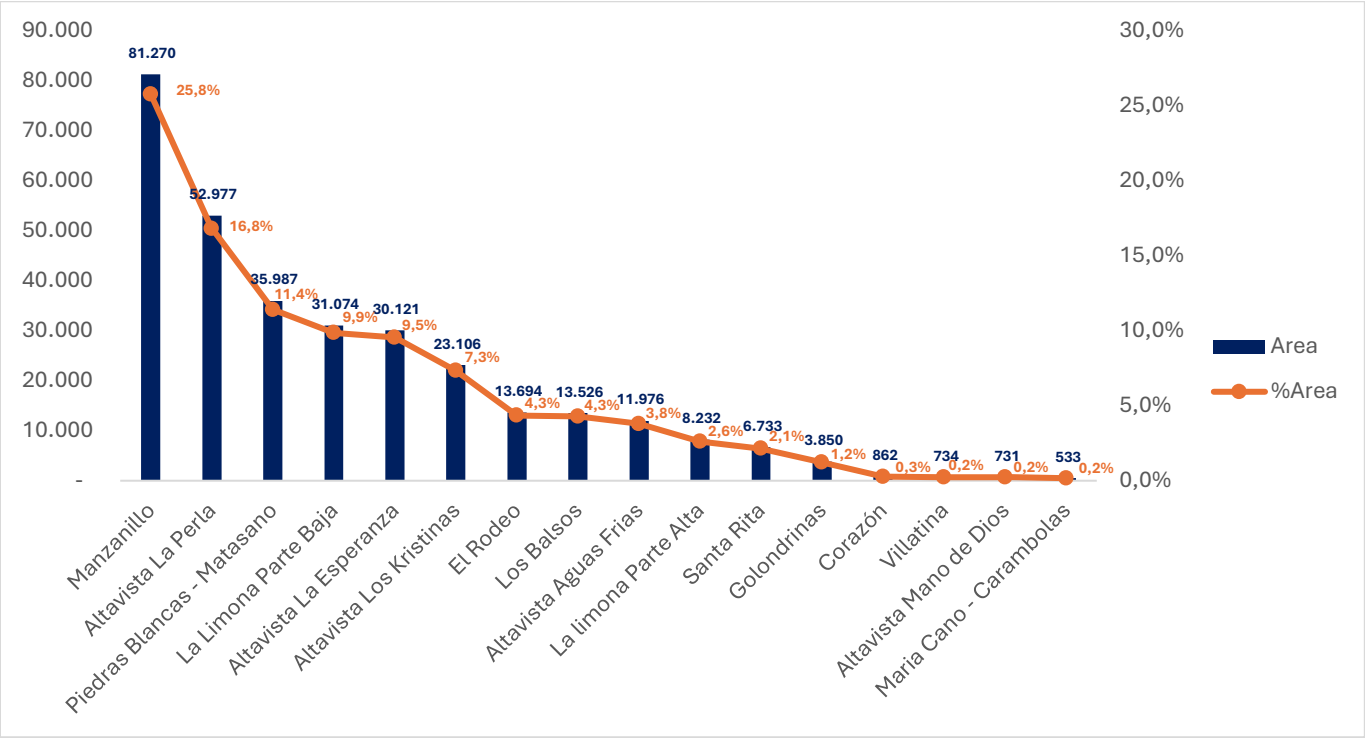


Ilustración 61. Área(m2) afectada por zona de análisis.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

El Manzanillo representa la zona con mayor área afectada, con aproximadamente el 25,8% del total según la información suministrada. Le siguen Altavista La Perla (16,8%), Piedras Blancas – Matasano, que corresponde a un único evento con el 11,4%, La Limona Parte Baja (9,9%) y Altavista La Esperanza (9,5%), lo cual evidencia una concentración importante de fenómenos en la zona suroccidental del distrito de Medellín.

Proporción de los procesos por zona

Los eventos fotointerpretados fueron clasificados en tres categorías principales: deslizamientos, flujos y reptación. La distribución porcentual por zona se muestra a continuación (Ilustración 62):

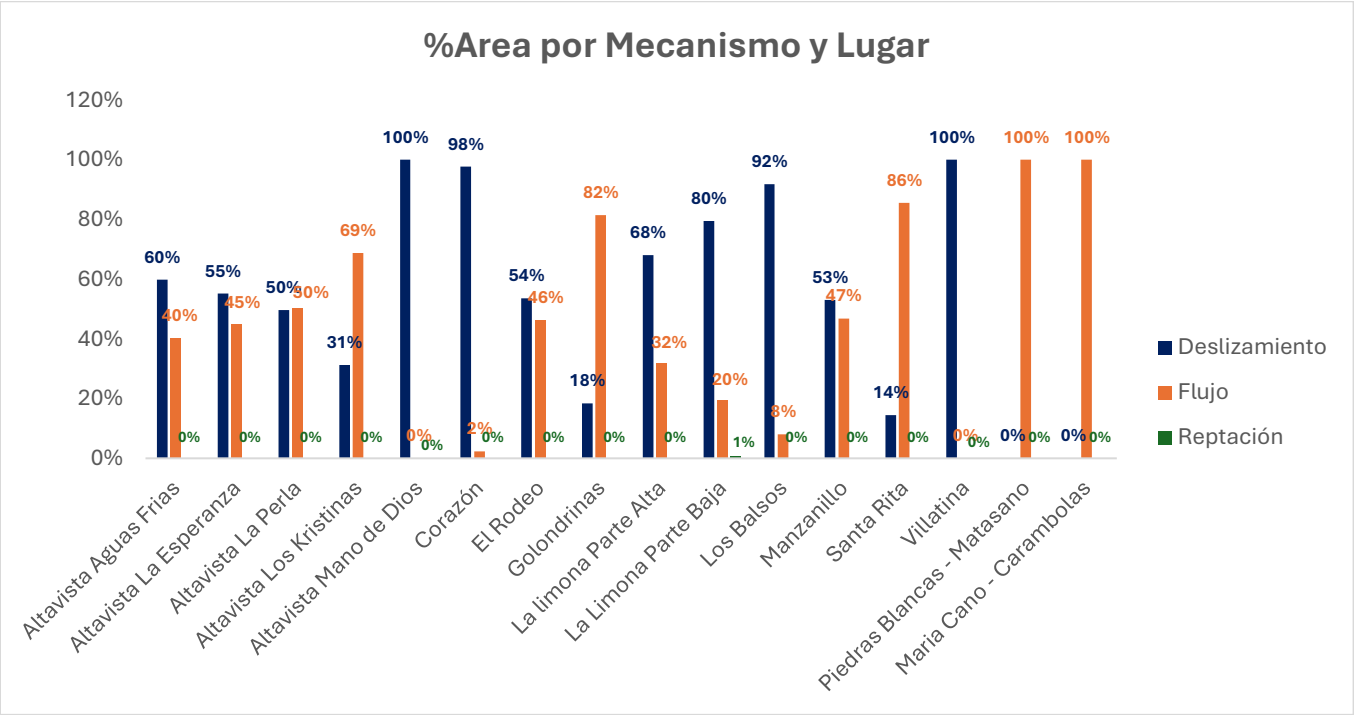


Ilustración 62. Porcentaje de área según el tipo de proceso por zona de análisis.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

A nivel general, los deslizamientos representan la mayoría de los eventos identificados sobre la información proporcionada. Sin embargo, sectores como Santa Rita y Golondrinas presentan una alta predominancia de movimientos en masa tipo flujo, al igual que Piedras Blancas – Matasano y María Cano – Carambolas, estas dos últimas asociadas a un único evento.

A continuación, se presenta el mapa con los eventos reportados recientemente, la mayoría de la información se presenta en el sector suroccidental del distrito y se identificó información desde el 29 de abril hasta el 24 de junio de 2025 (Ilustración 63).

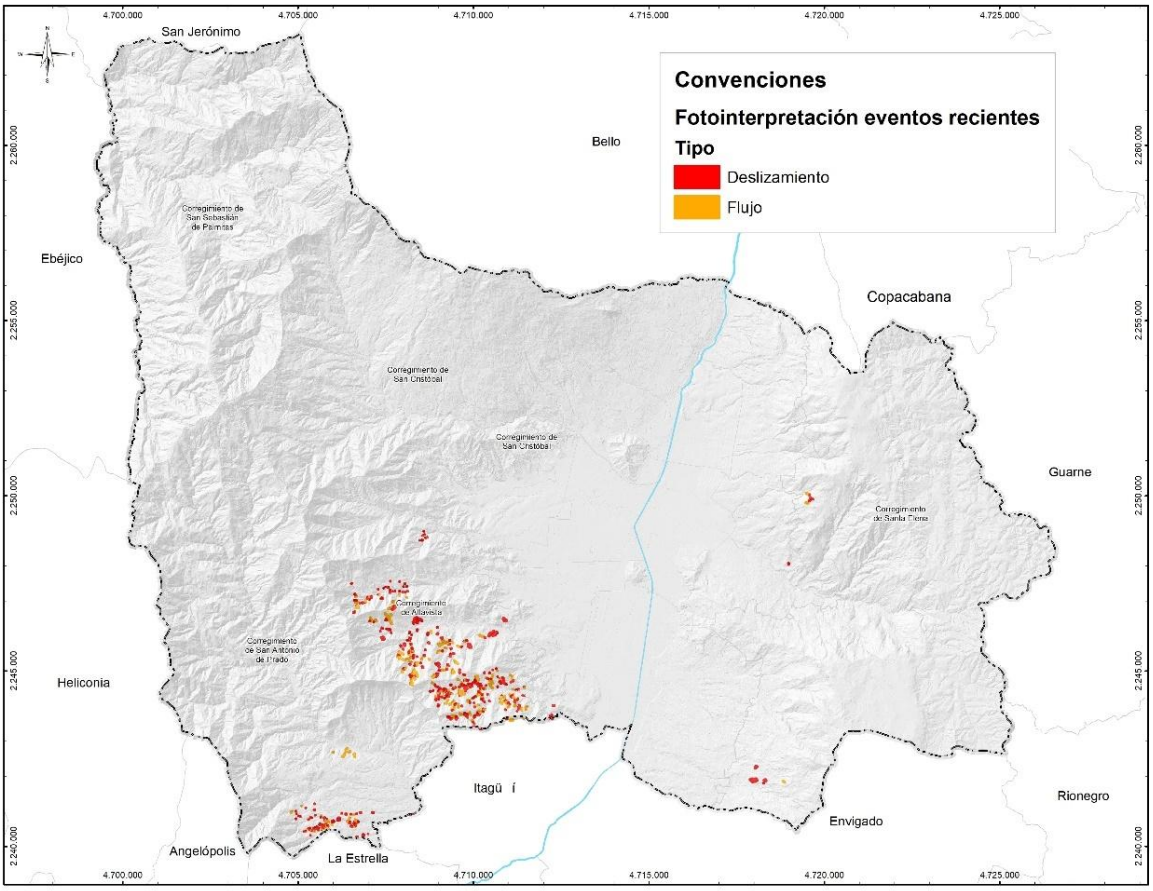


Ilustración 63. Mapa de eventos – fotointerpretación a partir de información reciente.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

La actualización del inventario con base en estos nuevos procesos fotointerpretados fortalece el insumo principal del modelo de susceptibilidad, al incorporar eventos recientes y de alta resolución espacial. Esta información no solo mejora la calibración del modelo, sino que también ofrece un panorama actualizado de las zonas críticas del territorio.

Dada la magnitud de los eventos recientes presentados se realizan visitas de campo a algunos puntos críticos en compañía del DAGRD y la EDU para la caracterización en inventario de estos, en la Ilustración 64 se presentan algunas fotografías de las visitas, especialmente en el sector de Altavista.



Ilustración 64. Visitas a puntos críticos, sector de Altavista.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Procesos en suelo rural

A continuación, se presenta una caracterización detallada de eventos morfodinámicos recientes identificados en el suelo rural en los corregimientos de San Antonio de Prado, Santa Elena y Altavista.

Corregimiento de San Antonio de Prado

En la vereda La Verde del corregimiento San Antonio de Prado, a partir de la información recolectada por el DAGRD, se identificó un movimiento en masa tipo deslizamiento rotacional localizado en la vereda La Verde, corregimiento de San Antonio de Prado, en las coordenadas 6,189754 N y -75,638594 W (ver Ilustración 65). El evento corresponde a un fenómeno de origen socionatural, con una secuencia evolutiva de carácter retrogresivo y una velocidad de desplazamiento lenta.



Ilustración 65 Deslizamiento en la vereda La Verde

Fuente: DAGRD, 2025.

El proceso se desarrolla sobre materiales geológicos asociados al Stock de Altavista y en la unidad geomorfológica Lomos, en un sector donde predominan pendientes entre 15° y 30°. En cuanto al uso del suelo, predominan actividades residenciales y agropecuarias, las cuales coexisten con las condiciones naturales de la ladera.

Durante la visita técnica se evidenció la presencia de intervenciones antrópicas asociadas a cortes y excavaciones en el terreno, así como algunas obras de drenaje. Adicionalmente, se identificaron manifestaciones típicas de inestabilidad, tales como deformaciones superficiales, grietas de tracción y rasgos morfológicos característicos de movimientos en masa (Ilustración 66).

Entre los principales factores condicionantes del fenómeno se encuentran la pendiente del terreno, las características geotécnicas de los materiales superficiales, la presencia de drenajes naturales y las intervenciones antrópicas relacionadas con la modificación de la ladera, la ocupación del suelo y el manejo inadecuado de las aguas superficiales. Por su parte, las precipitaciones intensas constituyen el principal factor detonante potencial.



Ilustración 66 Evidencias del deslizamiento observadas durante las inspecciones de campo

Fuente: DAGRD, 2025.

Otro evento también localizado en la vereda La Verde del corregimiento de San Antonio de Prado, en las coordenadas 6,19634° N / 75,656624° O, sobre el costado occidental de la zona donde se ubican los galpones de la Empresa PolloCoa, en la ladera que se extiende hacia la margen izquierda de la quebrada Doña María, en el tramo comprendido entre La Institución Educativa El Encanto y el sector Santa Rita (Ilustración 67). Corresponde a un movimiento en masa de tipo flujo de lodos desarrollado sobre la unidad geomorfológica de lomos, en un sector donde se identificaron depósitos de vertiente y el material movilizado presenta alta variabilidad textural y granulométrica en virtud de las características del perfil de meteorización del Stock de Altavista que expone grandes espesores de saprolito limoarenoso y zona de transición suelo-roca.



Ilustración 67 Flujo en la vereda La Verde

Fuente: DAGRD, 2025.

El fenómeno tiene origen natural y afectó un área de uso mixto residencial y agropecuario, sobre la cual se desplazó el material movilizado. De acuerdo con el reporte del evento, sus consecuencias incluyeron la pérdida de dos vidas humanas, la obstrucción total de la quebrada Doña María, la muerte de animales y el colapso parcial de la infraestructura de una granja avícola (Ilustración 68).



Ilustración 68 Evidencias del flujo observadas durante las inspecciones de campo

Fuente: DAGRD, 2025.

Corregimiento de Santa Elena

El proceso identificado se ubica en la vereda Piedras Blancas – Matasano del corregimiento de Santa Elena, en las coordenadas 6,251601° N / 75,537364° O. Corresponde a un proceso de origen socionatural desarrollado sobre depósitos antrópicos en sectores con pendientes superiores a 30°. Se clasifica como un deslizamiento rotacional con secuencia retrogresiva que, en su estado actual, se encuentra inactivo, y cuyas afectaciones se manifiestan sobre la infraestructura de caminos peatonales del sector (Ilustración 69).

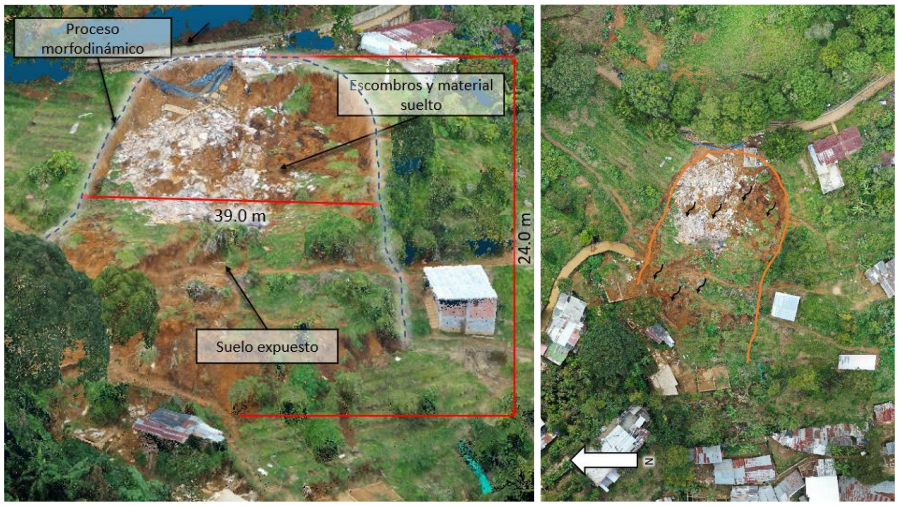


Ilustración 69 Deslizamiento en vereda Piedras Blancas - Matasano

Fuente: DAGRD, 2025.

Otro evento en la vereda Piedras Blancas – Matasano se dio en el sector Las Flores - Granizal, corregimiento de Santa Elena, coordenadas 6,29618° N / 75,5273° O. El fenómeno se materializó el 24 de junio de 2025 y corresponde a un movimiento en masa de tipología deslizamiento traslacional con comportamiento de flujo, de origen socionatural y estado activo al momento de la inspección por riesgo registrada en el informe Técnico N°127899 del DAGRD (Ilustración 70).



Ilustración 70 Evidencias del deslizamiento traslacional observadas durante las inspecciones de campo

Fuente: DAGRD, 2025.

Geológicamente, el área se emplaza sobre la Dunita de Medellín, unidad ígnea ultrabásica cuyo perfil de meteorización clasificado como saprolito (IC) constituye el material involucrado en el proceso. Como formaciones superficiales se identificaron depósitos de vertiente. El comportamiento pseudokárstico de la Dunita representa un factor condicionante relevante. Geomorfológicamente, la ladera presenta perfiles convexos con lomos en U que concentran la escorrentía hacia la trayectoria del movimiento. El volumen movilizado se estima en 75.000 m^3, con una superficie de falla de 143 m de longitud, 50 m de ancho y 20 m de profundidad (Ilustración 71).

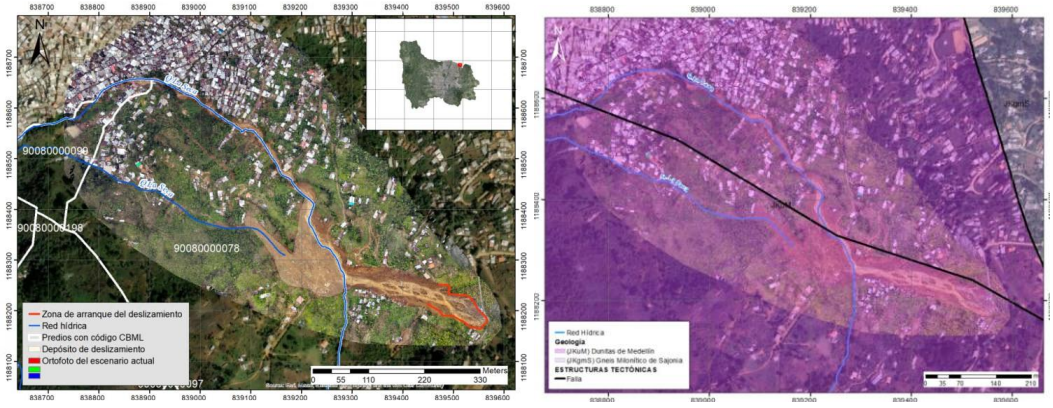


Ilustración 71 Condiciones geológicas del área del deslizamiento

Fuente: DAGRD, 2025.

Los factores detonantes principales fueron las altas precipitaciones, las condiciones geológicas e hidrogeológicas del terreno y las intervenciones antrópicas mediante cortes y excavaciones sin obras de drenaje adecuadas. Entre los elementos expuestos comprenden edificaciones en la corona con riesgo de colapso y el cauce de la quebrada La Seca con riesgo de obstrucción (Ilustración 72).



Ilustración 72 Elementos expuestos en el área de la corona del deslizamiento

Fuente: DAGRD, 2025.

Un siguiente evento ocurrió en la vereda Las Palmas del corregimiento de Santa Elena, el Informe Técnico N.° 124871 del DAGRD corresponde a una inspección de emergencia realizada el 6 de mayo de 2025, en límites con la comuna 14 – El Poblado, sector Loma Los Balsos, en las coordenadas 6,18234° N y 75,55048° O. Durante la visita se verificó la ocurrencia de un movimiento en masa tipo deslizamiento, de origen socionatural, materializado el mismo día de la inspección y asociado a una situación de emergencia que ocasionó la obstrucción total de un tramo de la vía Calle 16A Sur (Ilustración 73).



Ilustración 73 Evidencias del deslizamiento ocurrido en el sector Loma Los Balsos

Fuente: DAGRD, 2025.

El fenómeno se desarrolló en un sector caracterizado geológicamente por depósitos de flujos de escombros cuaternarios de origen antrópico, constituidos por llenos, escombros y acumulaciones de lodos, suprayaciendo localmente afloramientos de la unidad Anfibolita de Medellín. Geomorfológicamente, el área corresponde a una ladera de pendiente moderada a alta, caracterizado como superficies suaves en depósitos moderadamente incisados, condición que favorece los procesos de escorrentía y erosión superficial. Se evidencian intervenciones antrópicas sobre la red hídrica, tales como modificaciones de drenajes naturales, captaciones y almacenamiento de agua, canales artificiales y descargas de escorrentía superficial, además de procesos erosivos activos. Estas condiciones alteraron el comportamiento hidrológico del sector, favoreciendo la concentración de flujos superficiales, la infiltración en el subsuelo y el incremento de las presiones de agua dentro del terreno, factores que contribuyeron a la inestabilidad observada.

Entre los principales factores condicionantes y detonantes identificados se encuentran las altas precipitaciones registradas en el sector, la concentración e infiltración de aguas de escorrentía, las características geológicas y topográficas del terreno, la erosión concentrada y las intervenciones antrópicas asociadas a modificaciones de cauces y drenajes naturales (Ilustración 74).



Ilustración 74 Condiciones geológicas y manejo de aguas del deslizamiento en el sector Loma Los Balsos

Fuente: DAGRD, 2025.

Como consecuencia del evento se presentó la obstrucción total de la vía Calle 16A Sur – Loma Los Balsos y la generación de condiciones de amenaza sobre edificaciones localizadas en el área de influencia del movimiento en masa (Ilustración 75). Debido a las condiciones identificadas durante la inspección, el DAGRD determinó un nivel de amenaza alto, vulnerabilidad alta y riesgo alto, recomendando la evacuación temporal preventiva de once unidades residenciales y comerciales expuestas al fenómeno.



Ilustración 75 Edificaciones localizadas en el área de influencia del movimiento en masa

Fuente: DAGRD, 2025.

Corregimiento de Altavista

En la vereda El Jardín del corregimiento de Altavista se presentó otro proceso morfodinámico, de acuerdo con el informe Técnico N.° 124324 del DAGRD que corresponde a una inspección por riesgo realizada el 30 de abril de 2025, en las coordenadas 6,20755° N y 75,61666° O, en un sector cercano a la vía de acceso al Cerro de las Tres Cruces. Durante la visita se verificó la ocurrencia de un movimiento en masa tipo deslizamiento, materializado el 29 de abril de 2025, clasificado como un fenómeno de origen socionatural (Ilustración 76).



Ilustración 76 Deslizamiento en sector de la vereda El Jardín

Fuente: DAGRD, 2025.

El evento se desarrolló sobre una ladera de gran altura, con pendientes superiores al 30 %, localizada sobre la unidad geológica Stock de Altavista y asociada a la unidad geomorfológica de Lomos. El sector presenta suelos con altos contenidos de humedad, escasa cobertura vegetal y ausencia de obras para el manejo de aguas y la estabilización de taludes. Durante la inspección de campo se identificaron grietas de tracción en la corona del deslizamiento, las cuales evidencian condiciones de inestabilidad activa y un elevado potencial de retroceso y evolución del proceso de remoción en masa.

Entre los principales factores condicionantes y detonantes identificados se encuentran las precipitaciones intensas registradas en la zona, la concentración y circulación de escorrentía superficial sin canalización adecuada, las características geológicas y geomorfológicas del terreno, el incremento de la presión de poros en el suelo y la ausencia de sistemas de drenaje que permitan controlar la infiltración y acumulación de agua en el talud.

Como consecuencia del movimiento en masa, se produjo la obstrucción total de la vía hacia el Cerro de las Tres Cruces, en el sector correspondiente a la carrera 39A con calle 4D Sur, así como la obstrucción parcial de la vía principal de la vereda El Jardín (calle 5 Sur). Adicionalmente, se identificó la afectación potencial de ocho edificaciones de uso residencial y dos unidades productivas pertenecientes al Club Las Palmeras, localizadas en la parte baja del talud y dentro de la trayectoria del material movilizado (Ilustración 77).



Ilustración 77 Evidencias de las afectaciones del deslizamiento en la vereda El Jardín

Fuente: DAGRD, 2025.

En atención a las condiciones de riesgo observadas, el DAGRD ordenó la evacuación temporal preventiva de 18 unidades, entre habitacionales y productivas, con el fin de salvaguardar la integridad de sus ocupantes ante una posible reactivación o progresión del fenómeno. De acuerdo con el informe, no se registraron evacuaciones definitivas ni se reportaron personas fallecidas o lesionadas como consecuencia del evento.

7 MODELACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD Y LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

7.1 BASE DE DATOS GEOTÉCNICA

7.1.1 Generalidades

Se implementó una base de datos relacional donde se almacenó la información proveniente de las distintas fuentes secundarias presentadas en el **Informe de Revisión de Información Secundaria**. La información consolidada se resume en la Tabla 21, donde además se detalla la cantidad de registros que cuentan con información de ensayos SPT y, de estos, el número de muestras que disponen de parámetros geomecánicos y pesos unitarios naturales obtenidos a partir de ensayos de laboratorio. Estos últimos resultan de especial relevancia dado que constituyen el insumo principal para los modelos de amenaza por movimientos en masa, especialmente los de base física.

Tabla 21. Resumen de la información secundaria revisada, almacenada y procesada

Proyecto	Año	Tipo (*)	Cantidad sondeos	Cantidad muestras	Cantidad ensayos SPT	Cohesión – Angulo Fricción c'-φ'	Peso Unitario γ_n
Instrumentación y microzonificación sísmica del área urbana de Medellín	1999	EMZS	32	380	31	12	42
Microzonificación y evaluación del riesgo sísmico del Valle de Aburrá	2007	EMZS	50	344	36	37	80
Estudio red primaria sistema de distribución de agua de EPM	2011	EMZS	15	110	0	9	24
Estudios geológico–geotécnicos DAGRD	2006 2014	EGG	249	540	126	41	70
Estudios de detalle	2016 2022	ED	283	901	265	272	267

(*) EMZ: Estudios de microzonificación sísmica. EGG: Estudios geológico-geotécnicos.
Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Este proceso comprende la consolidación y vinculación de 629 registros de perforación derivados de campañas de exploración geotécnica asociadas a cada estudio, así como la incorporación de los resultados de los ensayos de laboratorio correspondientes, procesando un total de 2275 muestras. La ubicación espacial de los sondeos, tanto en el Distrito de Medellín como en los demás municipios del Valle de Aburrá, se presenta en la Ilustración 78.

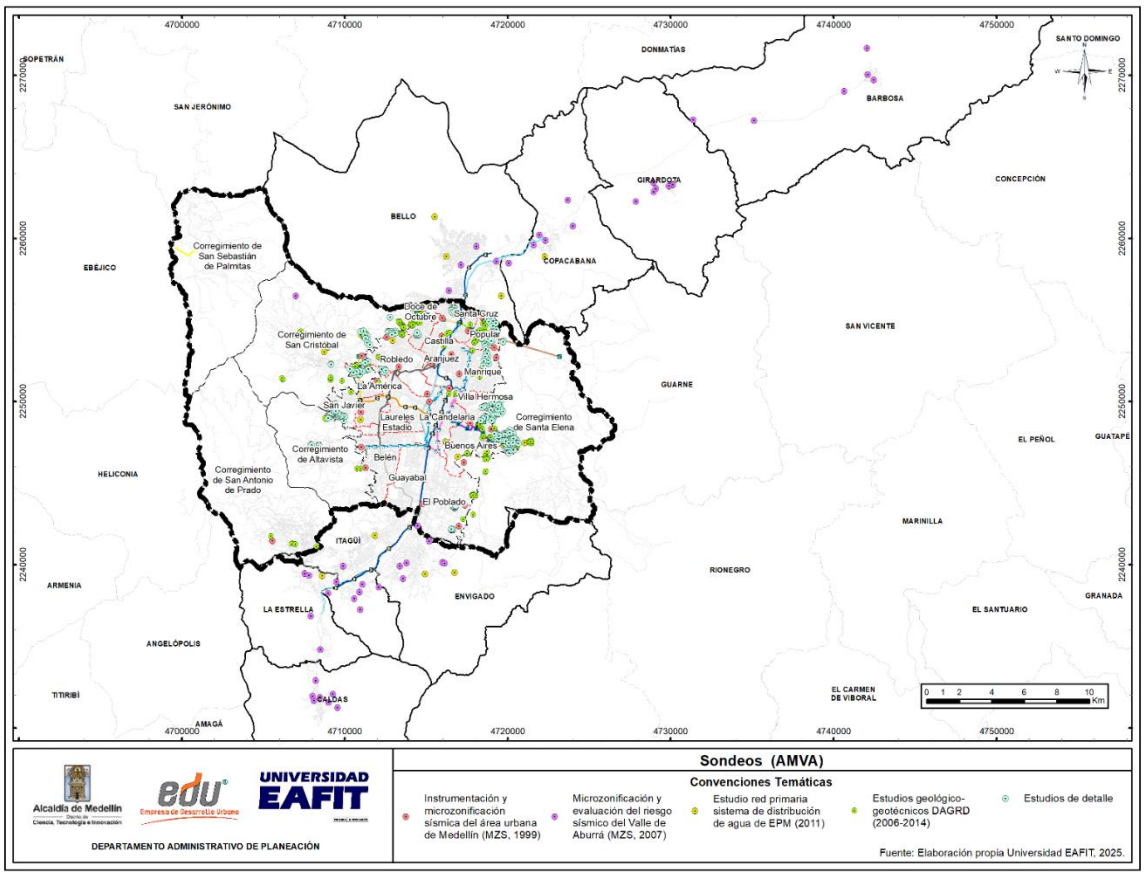


Ilustración 78. Ubicación geográfica de los sondeos registrados

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

7.1.2 Distribución de proyectos

En la Ilustración 79 se muestra la distribución de sondeos en Medellín y en los municipios del Área Metropolitana para cada una de las categorías de proyectos presentadas en la Tabla 21. Se observa que la información proveniente de los estudios geológico–geotécnicos proporcionados por el DAGRD seguidos por los estudios de detalle son los que proveen el mayor porcentaje de datos que alimenta la base de datos.

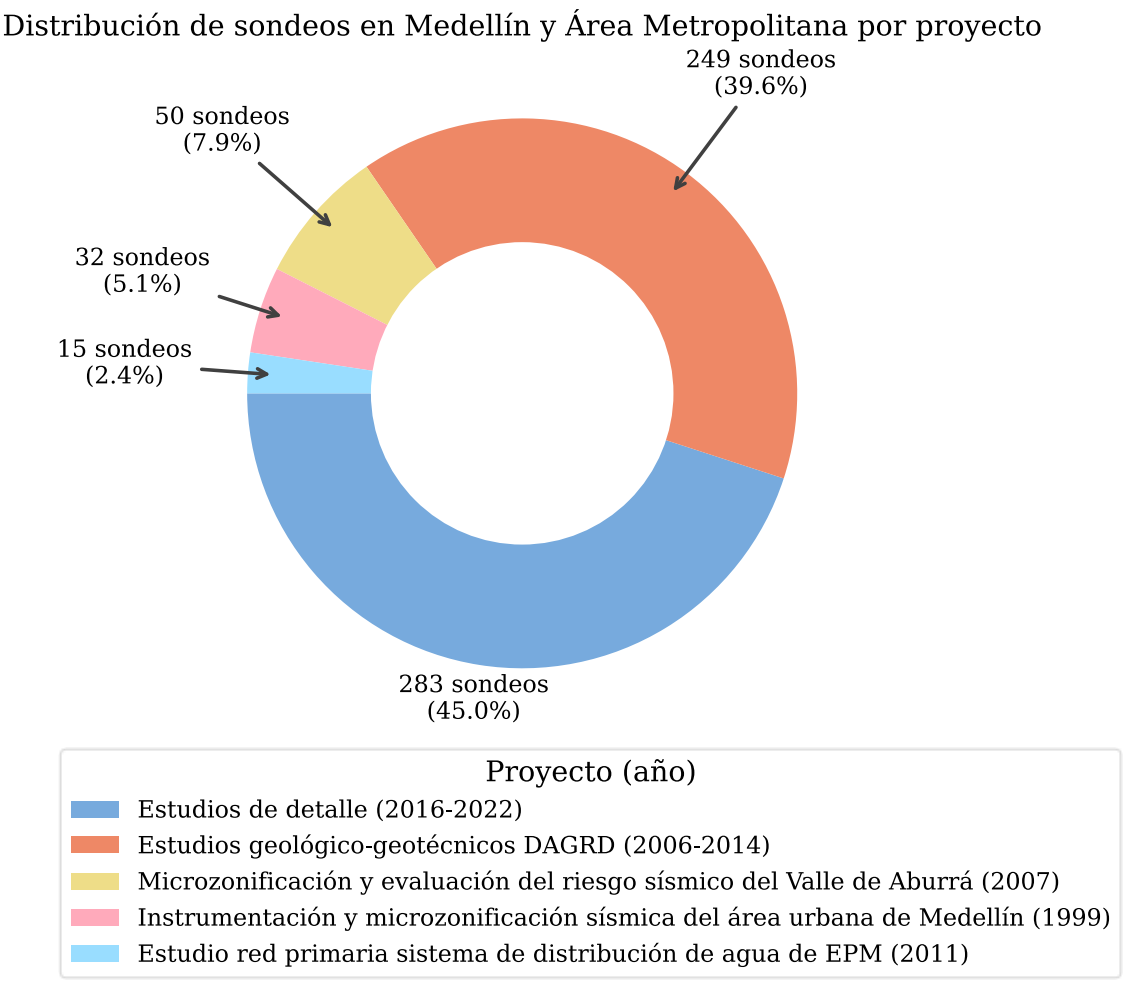


Ilustración 79. Distribución de sondeos por proyecto

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

7.1.3 Distribución de profundidades de los sondeos

La Ilustración 80 presenta la distribución de las profundidades alcanzadas por los sondeos registrados en la base de datos, agrupados para el Distrito de Medellín y los municipios del Área Metropolitana. Esta visualización permite identificar diferencias en la profundidad de exploración del subsuelo entre territorios que comparten características geomorfológicas, reflejando el nivel de detalle que puede esperarse en la caracterización de los parámetros geomecánicos del suelo.

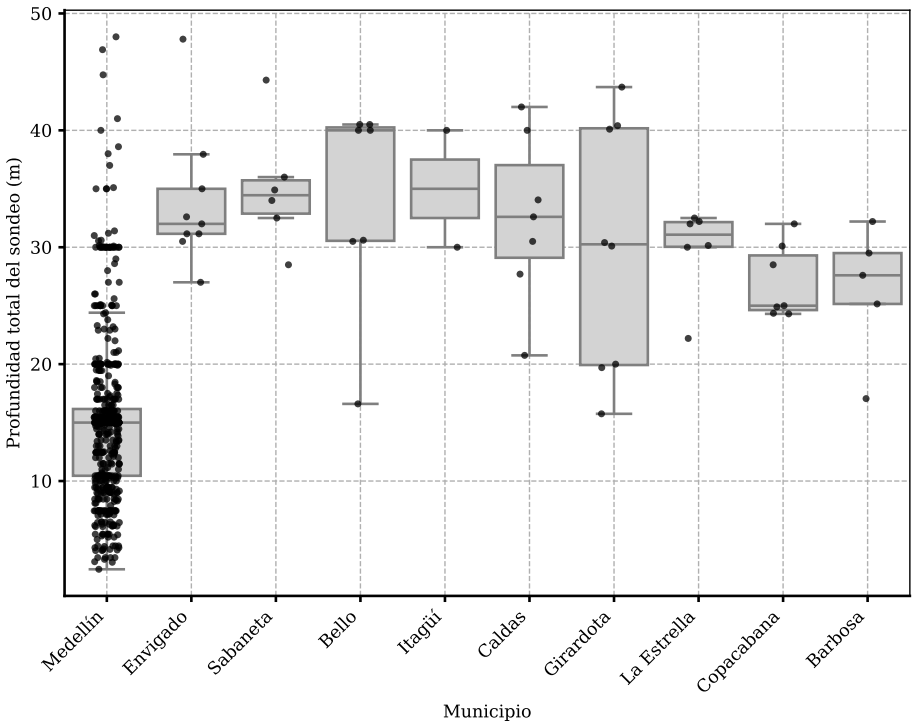


Ilustración 80. Distribución de profundidades de los sondeos de exploración geotécnica para el Distrito de Medellín y los municipios del Área Metropolitana

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Se observa que el distrito de Medellín ~~es el municipio que~~ concentra el mayor número de campañas y estudios técnicos. Los sondeos alcanzan en promedio mayores profundidades, pero también presentan una mayor dispersión, dado que las profundidades varían considerablemente según la magnitud y el objetivo de cada estudio. En los casos de los municipios aledaños a Medellín, como Envigado e Itagüí, se observan profundidades más homogéneas, relacionado con el hecho de que la mayor parte de la información disponible para estos municipios proviene de estudios tipo EMZS, que tienden a explorar el suelo hasta profundidades similares.

7.1.4 Análisis estadístico exploratorio

El objetivo de estos análisis es observar la distribución, dispersión y comportamiento de los parámetros comparando, por ejemplo, entre las diferentes unidades geológicas del Distrito de Medellín y de los municipios aledaños, como Bello, Envigado e Itagüí. Este enfoque se justifica considerando que los procesos morfodinámicos asociados a los movimientos en masa no se restringen a los límites administrativos de los municipios, sino que pueden ocurrir en sus fronteras. De manera similar, las laderas no se delimitan por los límites municipales, sino por las características del relieve del terreno, las cuales pueden extenderse en varias jurisdicciones.

Los análisis estadísticos realizados están orientados a identificar patrones en las propiedades de los suelos que conforman el Distrito de Medellín, así como a detectar inconsistencias o vacíos en la información que requieran validación adicional o justifiquen una recomendación para ampliar la caracterización geotécnica. En la Ilustración 81 se evidencia la variabilidad de los parámetros por unidad geológica, especificando además el proyecto al cual se encuentra asociado cada dato.

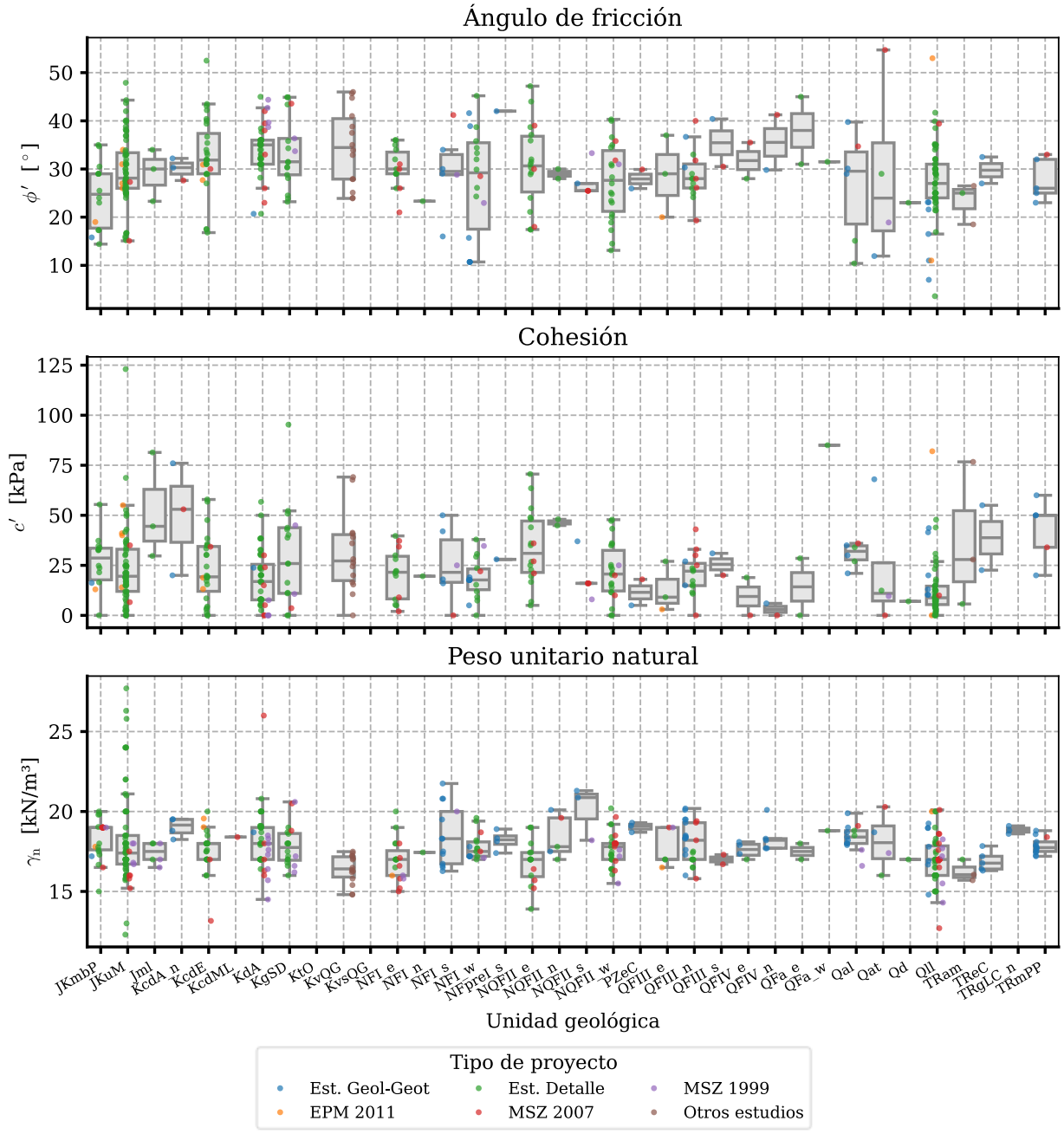


Ilustración 81. Distribución de los parámetros geomecánicos por unidad geológica y tipo de proyecto

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

En general, el ángulo de fricción efectivo se concentra entre 25 y 38°, con algunas unidades que alcanzan valores mayores que 40°, lo que sugiere materiales con alta resistencia por fricción, aunque no se descartan efectos de dilatancia durante los ensayos de resistencia; también aparecen valores menores a 20° siendo particularmente bajos en los depósitos antrópicos. La cohesión muestra muy alta variabilidad como es de esperarse; dominan los datos en el intervalo 0 a 40 kPa pero se observan colas incluso mayores a 80 kPa en unidades puntuales, indicativas de estructura en los suelos residuales y depósitos de vertiente con algo de meteorización, no obstante, no se descartan efectos numéricos en el intercepto de la envolvente de resistencia al ajustar los datos experimentales. El peso unitario natural es el parámetro menos variable; la mayoría de las unidades están entre 16–20 kN/m^3, con algunos casos de 21–23 kN/m^3 (materiales densos y/o con altos contenidos de ferromagnesianos) y mínimos de 14–15 kN/m^3 (suelos con alta porosidad o contaminación con materia orgánica).

Dentro de las limitaciones se destaca que hay tamaños muestrales desiguales entre unidades. La mezcla de metodologías y épocas (p. ej., MSZ 1999/2007 vs. estudios recientes) puede introducir sesgos (equipos, procedimientos en los laboratorios, variaciones en las normas técnicas, etc.), lo que explica parte de la heterogeneidad y variabilidad observada, no obstante, la principal fuente de esta es la condición intrínseca de los materiales geológicos.

7.1.5 Agrupación por zonas geológico-geotécnicas

Tras el análisis estadístico exploratorio y con el propósito de optimizar los insumos geotécnicos para los modelos de amenaza, se agruparon las unidades geológicas del Valle de Aburrá en once (11) zonas geológico-geotécnicas, definidas a partir de su naturaleza o génesis geológica y sus características geomecánicas. La agrupación de las unidades geológico-geotécnicas se realizó como una estrategia de parametrización regional acorde con la escala y alcance de los estudios básicos de amenaza. Esta agrupación no supone que los materiales incluidos dentro de cada zona sean homogéneos en sentido estricto, ni desconoce la variabilidad geológica y geotécnica propia del Distrito de Medellín. Por el contrario, busca definir dominios con afinidad litológica, genética y geomecánica que permitan representar de manera coherente el comportamiento esperado de los materiales en los análisis de susceptibilidad y amenaza. Adicionalmente, la integración de unidades con características comparables permite contar con tamaños muestrales más amplios por zona, lo cual favorece una caracterización estadística más robusta de la variabilidad de los parámetros geomecánicos. En este sentido, la variabilidad residual al interior de cada dominio no se descarta, sino que se incorpora explícitamente mediante el análisis estadístico de los parámetros disponibles, incluyendo medidas de tendencia central, dispersión, coeficientes de variación y distribuciones probabilísticas empleadas en la modelación física estocástica.

La agrupación resultante se presenta a continuación en la Tabla 22.

Tabla 22. Zonas geológicas establecidas para las unidades geológicas del Distrito de Medellín y los municipios del Área Metropolitana

Código unidad	Nombre unidad	Zona geológico-geotécnica
JgR	Gabros de Romeral	1
JuR	Peridotitas de Romeral	
KgSD	~~Gabro~~ Stock de San Diego	
JKgmS	Gneis Milonítico de Sajonia	2
JKmbP	Metabasitas del Picacho	
Jml	Milonitas de La Iguaná	
TRgLC	Gneis de La Ceja	
TRgP	Gneis de Palmitas	
TRmPP	Migmatitas de Puente Peláez	
TReaB	Esquistos anfibolíticos de Baldías	3
TReC	Esquistos de Cajamarca	
JKuM	Dunitas de Medellín	4
KcdA_n	Batolito Antioqueño	5
KcdA_s		
KcdE	Stock de Las Estancias	
KcdML	Stock de Media Luna	
KtO	Batolito ~~Tonalita~~ de Ovejas	
KvQG	Complejo Quebradagrande -Miembro volcánico	6
KvsQG	Complejo Quebradagrande - Miembro volcanosedimentario	
Qal	Depósitos aluviales	7
Qat	Depósitos aluviotorrenciales	
Qll	Depósitos antrópicos - Llenos ~~antrópicos~~	8
NFl	Depósitos de vertiente - flujos de escombros y/o lodos	9
NFprel		
NQFll		
QFa		
QFIII		
QFIV		
Qfle		
Qd	Depósitos de vertiente – depósitos de deslizamiento	
TRaM	Anfibolitas de Medellín	10
KdA	Stock de Altavista	11

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Posteriormente, para estas zonas geológicas se llevó a cabo un análisis estadístico análogo al aplicado a todas las unidades, cuyos resultados se muestran en la Ilustración 82. Se observa que las zonas con mayor cantidad de datos son la zona 4 (Dunitas de Medellín), la zona 8 (Llenos antrópicos) y la zona 9 (Depósitos de flujos de escombros y/o lodos), mientras que las menos exploradas corresponden a la zona 3 (Esquistos) y la zona 10 (Anfibolitas de Medellín). Con excepción de estas últimas, se mejora sustancialmente el balance del número de datos por agrupación respecto al análisis previo, reduciendo en cierta medida la dispersión de los parámetros geomecánicos respecto al análisis individual de cada unidad.

En general, para la mayoría de las zonas los parámetros presentan una dispersión significativa, lo cual reafirma la marcada heterogeneidad geológica de los materiales que conforman el Distrito de Medellín y en general el Valle de Aburrá. Finalmente, la agrupación en once zonas geológicas permitió homogeneizar parcialmente las unidades originales.

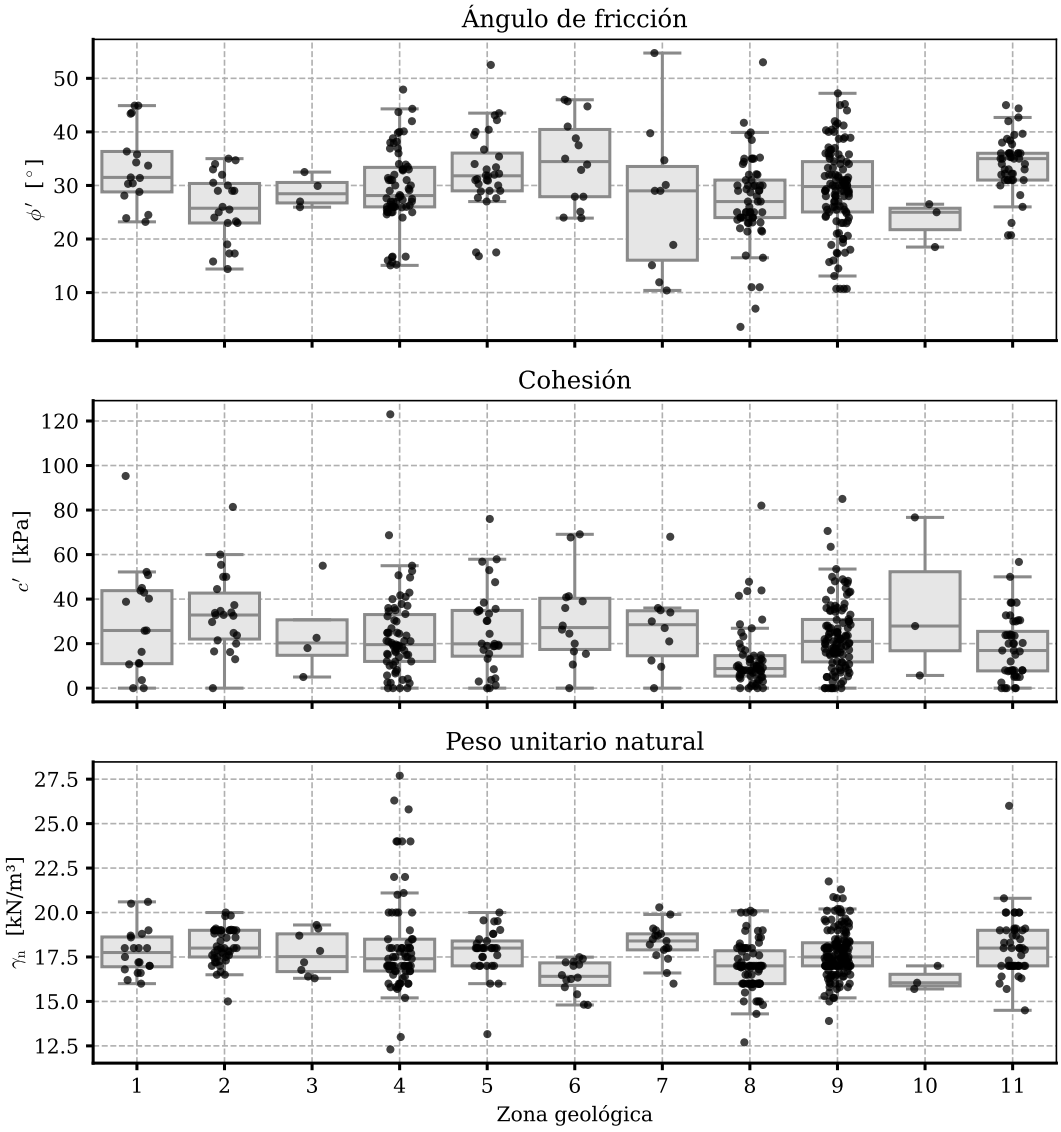


Ilustración 82. Distribución de los parámetros geomecánicos por zona geológica

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

7.2 DELIMITACIÓN DE UNIDADES DE LADERA (UL)

Una unidad de ladera (UL) es una subdivisión geomorfológica homogénea del terreno, delimitada naturalmente por divisorias de aguas y drenajes, utilizada como base para evaluar la susceptibilidad y la amenaza por movimientos en masa. Esta sección de análisis generalmente es la de máxima pendiente o la que se alinea con el aspecto del talud (SGC, 2017). Las UL son definidas a escala 1:2.000, considerando simultáneamente la geometría de las cuencas, las divisorias topográficas, la orientación de las laderas y la homogeneidad morfométrica interna, permitiendo representar de manera objetiva los dominios geomorfológicos asociados a la dinámica de ladera. Diversos estudios han demostrado que este tipo de unidades constituye una de las discretizaciones espaciales más

adecuadas para análisis de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa, debido a que capturan de forma consistente la variabilidad geomorfológica del terreno y los controles topográficos que condicionan los procesos de inestabilidad (Alvioli et al., 2016).

7.2.1 Generalidades

En el presente estudio se utilizó el módulo `r.slopeunits`, desarrollado por Alvioli et al. (2016), que permite la delineación automática de Unidades de Ladera (UL) a partir de un modelo digital de elevación (DEM). De forma opcional, es posible incluir una capa con zonas de baja pendiente, como planicies aluviales o llanuras de inundación, para excluirlas del análisis.

Los parámetros principales utilizados por el modelo son:

- `thresh` (t): Umbral de área de acumulación de flujo mínima para definir cauces.
- `areamin` (a): Área mínima permitida para una UL.
- `cvmin` (c): Varianza circular mínima de la orientación del terreno (*aspecto*), utilizada como medida de homogeneidad interna definida de cada unidad. Se define como:

$$c = 1 - \frac{|\boldsymbol{R}|}{N_v}$$

  donde N_v es el número de celdas dentro de la UL, y $|\boldsymbol{R}|$ es la magnitud del vector $\boldsymbol{R}$, correspondiente a la sumatoria de todos los vectores unitarios que describen la orientación de cada celda.
- `rf` (r): Factor de reducción de t aplicado de manera iterativa.
- `cleansize`: Área mínima aceptada tras la etapa de limpieza, que elimina unidades mal conformadas o demasiado pequeñas.

En términos generales, el algoritmo comienza generando cuencas de gran tamaño a partir del umbral t. Estas cuencas se subdividen en cuencas medias (*half-basins*) y, luego, se particionan iterativamente con base en los parámetros definidos. Las zonas planas, si se especifican, son excluidas del proceso. Finalmente, se aplican filtros de limpieza para eliminar unidades que no cumplan con los criterios establecidos.

En el caso del Distrito de Medellín, las UL generadas presentan una alta correspondencia con los rasgos geomorfológicos del terreno. Inicialmente, se delinearon UL muy finas (123.000 unidades) para capturar con precisión estos rasgos. No obstante, para optimizar la carga computacional de los modelos, las UL fueron posteriormente escaladas y homogeneizadas mediante criterios morfométricos (pendiente y aspecto), integrando unidades vecinas con características similares. De este modo, se redujo el número total de UL, garantizando que las unidades finales conservaran una representación fiel de la morfología del terreno.

7.2.2 Implementación en el Distrito de Medellín

Para el caso de estudio se empleó un modelo digital de elevación (DEM) con resolución espacial remuestreada a 5 m. Luego de evaluar múltiples combinaciones de parámetros, se seleccionaron los siguientes valores con el objetivo de balancear el número y el tamaño de las UL generadas:

- $t = 0.1$ km²
- $a_{\text{mín}} = 2000$ m² (0.2 ha)
- $a_{\text{máx.}} = 3000$ m² (0.3 ha)
- $c = 0.15$
- $r = 5$
- número máximo de iteraciones: 150 (garantizando la convergencia previa)
- `cleansize` = 500 m²

Con esta configuración se generaron aproximadamente 124 000 UL, que posteriormente se redujeron a aproximadamente 100 000 UL mediante un proceso de homogeneización. Este consistió en integrar unidades vecinas cuando, en los píxeles contenidos en su interior, se cumplían simultáneamente las siguientes condiciones:

a. Diferencia en la mediana de la pendiente ≤ 5°
b. Diferencia en el aspecto ≤ 5°

La distribución final de las UL se presenta en la Ilustración 83 y con mayor detalle en los corregimientos del distrito en la Ilustración 84.

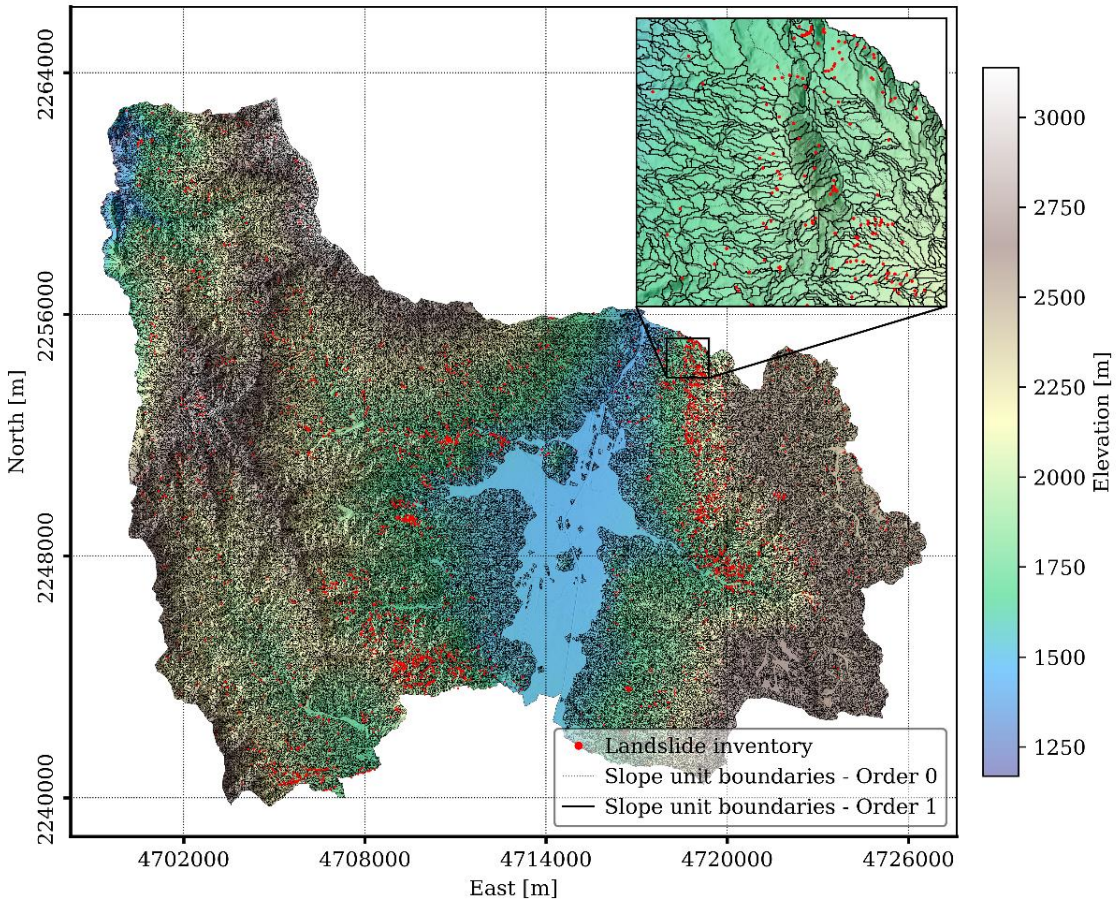


Ilustración 83. Mapa unidades de ladera en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

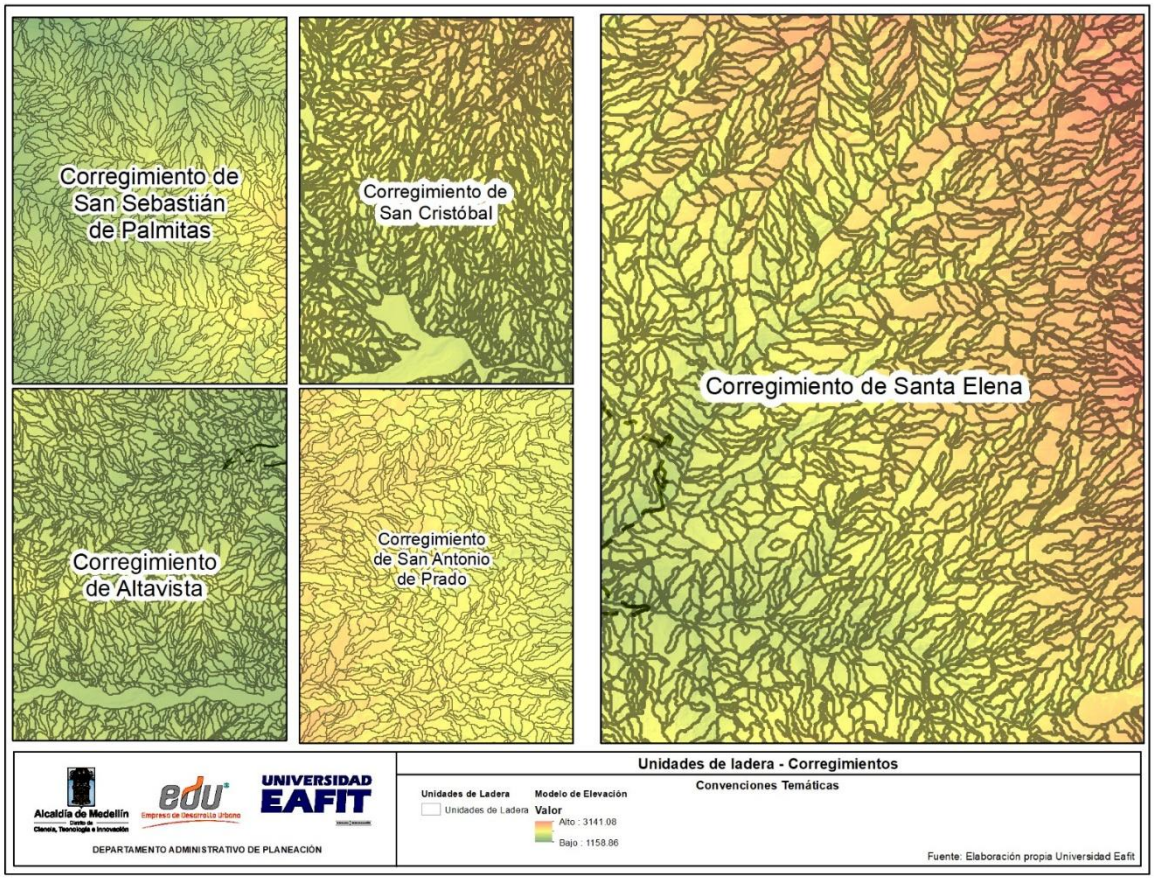


Ilustración 84. Detalle de las unidades de ladera en los corregimientos del Distrito de Medellín

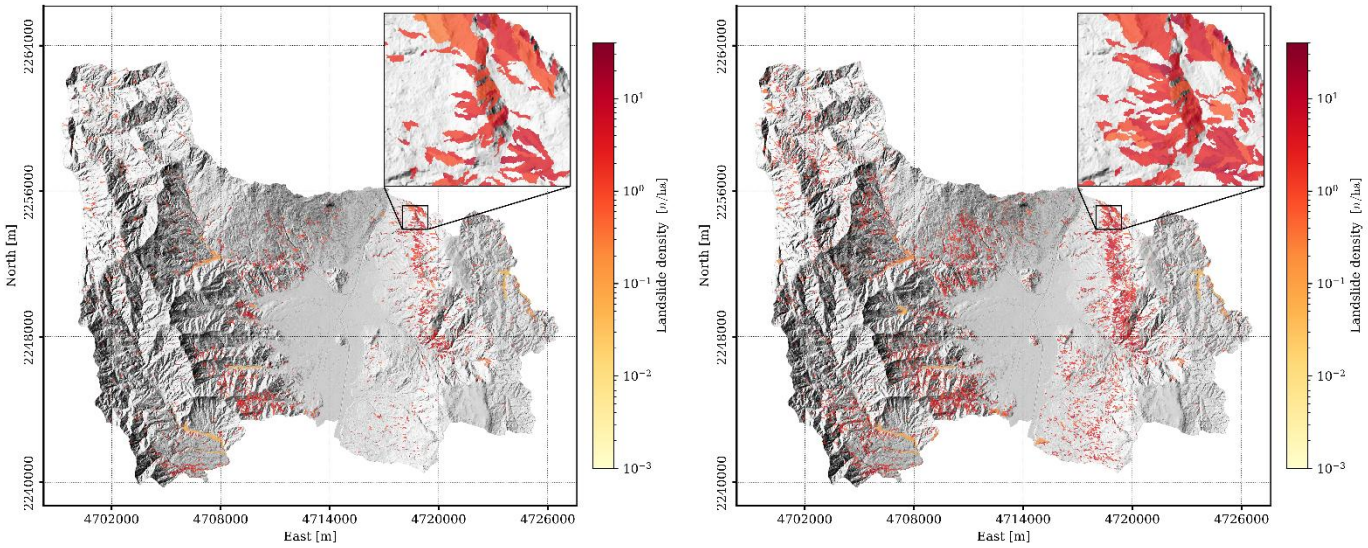
Fuente: Universidad EAFIT, 2025

7.2.3 Inventario de deslizamientos y su relación con las UL

La Ilustración 83 incluye, además del mapa de UL, un inventario de deslizamientos representado topológicamente por puntos. Este inventario proviene de un trabajo conjunto entre el DAGRD y el SIATA, complementado con datos adicionales suministrados por el Departamento Administrativo de Planeación (DAP) de Medellín. Dicho inventario se utilizó como insumo para validar la viabilidad de las UL y para actualizar el cálculo de la susceptibilidad y, posteriormente, la amenaza por movimientos en masa.

Se realizaron análisis preliminares de densidad de deslizamientos, definida como el número de eventos (n) por unidad de área de cada UL. Esta métrica se considera como indicador inicial de susceptibilidad y podrá ser contrastada posteriormente con los índices derivados de modelos probabilísticos. Los análisis se desarrollaron desacoplando los inventarios mencionados, permitiendo una evaluación diferenciada por fuente. Cabe destacar que el inventario DAGRD–SIATA presenta una mayor concentración de eventos en el área urbana del Distrito, mientras que el

inventario del DAP muestra una mayor concentración en el área rural, como se muestra en la Ilustración 85.



a) Inventario DAGRD–SIATA

b) Inventario DAP

Ilustración 85. Densidad de deslizamientos por área en cada UL en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

7.3 ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA

Con el objetivo de evaluar el desempeño de múltiples métodos en los análisis para el Distrito de Medellín, se consideraron dos aproximaciones para la representación del terreno (pixeles y unidades de ladera) y múltiples modelos como se esquematiza en la Ilustración 86 y en la Tabla 23.

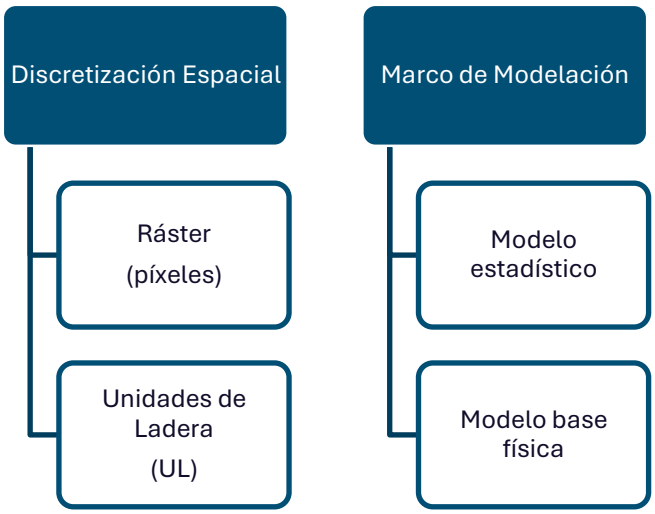


Ilustración 86. Esquema de la discretización espacial y el marco de modelación desarrollados para el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Tabla 23. Modelos ejecutados para el Distrito de Medellín

Tipo	Modelo	Discretización espacial
Estadístico	Peso de la evidencia	Ráster
	Regresión logística	Ráster
	Random Forest	Ráster
	Valor de la información	Ráster y Unidades de Ladera
Red neuronal	Modelo de red neuronal artificial (ANN)	Unidades de Ladera
Base física	Determinista	Unidades de Ladera
	Estocástico	

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

A continuación, se desarrollan los modelos utilizados para el análisis de susceptibilidad.

7.3.1 Modelos estadísticos

Este modelo emplea las variables morfométricas, físico – espaciales y categóricas (variables independientes o factores condicionantes), así como el inventario de deslizamientos (variable respuesta o independiente).

A continuación, se resume la descripción de las variables utilizadas como insumo para los modelos de susceptibilidad, los métodos estadísticos analizados, los resultados obtenidos y finalmente, las zonificaciones que resultan de los diferentes métodos.

7.3.1.1 Variables del modelo

Variables morfométricas

- Pendiente
  Se entienden como el ángulo de inclinación de una ladera con respecto a la horizontal, se expresan en grados o porcentaje. Esta variable está directamente relacionada con la ocurrencia de movimientos en masa, al tratarse estos de fenómenos gravitacionales en los que las pendientes de moderadas a fuertes están asociadas a mayores aceleraciones.
- Rugosidad
  Es una variable que refleja la variación de la pendiente dentro de un área específica y se calcula a partir de la desviación del vector normal a la superficie de cada celda del DEM, considerando áreas de 2x2 celdas. Su valor está normalizado en un rango de 0 a 1, donde los valores más altos indican superficies más regulares, es decir, menos rugosas, mientras que valores más bajos reflejan mayor dispersión de los vectores y, en consecuencia, mayor rugosidad.
- Curvatura
  Esta variable describe el grado de concavidad o convexidad de la superficie del terreno y se calcula a partir del DEM mediante derivadas de segundo orden, las cuales se evalúan en ventadas de 2x2 celdas. Esta medida indica si una celda presenta un cambio positivo (convexo) o negativo (cóncavo) respecto a sus vecinas, reflejando tendencias locales del relieve.
- Índice de relieve relativo
  El relieve relativo se define como la diferencia de elevación, expresada en metros, entre el punto más alto y el más bajo dentro de una unidad espacial determinada. Esta medida representa la variación topográfica interna de un área, sin hacer referencia a la altitud absoluta sobre el nivel del mar.
- Aspecto
  Representa la orientación de la pendiente, es decir, la dirección hacia la cual desciende la superficie del terreno, además, refleja la incidencia de factores ambientales como la radiación solar, el viento y la humedad.
- Dirección de flujo
  Indica la trayectoria que seguiría el agua superficial desde cada celda del terreno según la máxima pendiente descendente. Su análisis permite identificar patrones de drenaje, delimitar cuencas hidrográficas y comprender los procesos de concentración y transporte de la escorrentía superficial.

Variables físico - espaciales

- Distancia a vías
  Esta variable está relacionada con la inestabilidad generada por la construcción de proyectos lineales como vías, los cuales generan cambios en las condiciones iniciales de la topografía, como cortes y llenos que pueden desencadenar procesos de remoción en masa, por lo cual se realiza una evaluación de las distancias a estas intervenciones en franjas, las cuales marcan una determinada influencia de estos procesos en la estabilidad de la zona.
- Distancia a drenajes
  La distancia a drenajes es una variable físico–espacial que se asocia con la inestabilidad en las laderas influenciada por la presencia y dinámica de los sistemas de drenaje. Estos pueden inducir movimientos en masa a través de distintos mecanismos, como la infiltración de agua que incrementa la carga en el suelo, la profundización los cauces que reduce el soporte basal de las laderas, y la erosión lateral que debilita los bordes del terreno y favorece procesos de inestabilidad.
- Distancia a fallas
  Esta variable está relacionada con la inestabilidad generada por la presencia de fallas. En el Distrito de Medellín esta variable muestra la distancia a las fallas que se presentan a lo largo de todo el Distrito, en general con dirección SSE-NNE, las cuales muestran una importante densidad en la zona occidental del área municipal, en este sector se destacan las fallas de Ebéjico, Cauca-Romeral y San Jerónimo.

Variables categóricas

- Coberturas vegetales
  Representan las formaciones biológicas constituidas por plantas (árboles, arbustos, pastos, cultivos, entre otras) que cubren la superficie del terreno y cuyas características estructurales, funcionales y dinámicas influyen directamente en la estabilidad de laderas y en la susceptibilidad a movimientos en masa (deslizamientos, caídas de rocas, etc.).
  En el marco de un modelo de amenazas por movimientos en masa, las coberturas vegetales se consideran un factor de protección clave, ya que intervienen en la reducción del riesgo a través del anclaje mecánico del suelo, regulación del contenido de humedad del suelo y la protección contra la erosión superficial.

  Como se explicó en el numeral 5.2.4. para obtener las coberturas terrestres del Distrito, se utilizó como insumo principal el *feature class* “CoberturaTierra_UsoActual” de la *geodatabase* del POMCA del río Aburrá 2018. Luego se incorporaron las coberturas terrestres suministradas por planeación para los corregimientos de San Sebastián de Palmitas y San Antonio de Prado

y finalmente, se realizó la actualización de coberturas de todo el distrito, utilizando la ortofoto para el Distrito de Medellín del año 2024.

- Cambio de coberturas vegetales en el tiempo
  Representa los cambios ocurridos en las coberturas terrestres en un período de análisis multitemporal. Se clasifican las coberturas en categorías de Bosque y No bosque, posteriormente se analizan los cambios entre estas categorías, obteniéndose resultados de bosque estable (bosque año 0 y 1), no bosque estable (no bosque año 0 y 1), deforestación (bosque año 0 y no bosque año 1) y regeneración (no bosque año 0 y bosque año 1). Finalmente se califica el grado de cambio de la siguiente manera:
  - Bosque estable: Bajo
  - No bosque estable: Medio
  - Deforestación: Alto
  - Regeneración: Medio

  Este cambio se construyó a partir de un análisis multitemporal mediante la intersección espacial de las capas 2018 y 2024. Este procedimiento permitió generar una matriz de transición de coberturas, cuantificando las hectáreas de permanencia y cambio. Se puso especial énfasis en la transformación de coberturas rurales y seminaturales hacia usos antrópicos, validando los resultados mediante la interpretación visual de la ortofoto de alta resolución del Distrito.

- Geología
  Esta variable describe los materiales que se encuentran sobre la superficie, ya sean depósitos no consolidados o rocas, desde un estado fresco hasta los suelos desarrollados a partir de la meteorización. Es sobre estos materiales superficiales que los procesos morfodinámicos tienen lugar, lo que hace que la geología sea un insumo básico para el análisis de susceptibilidad de la amenaza por movimientos en masa.

- Geomorfología
  La geomorfología estudia las formas del relieve terrestre, su origen, evolución, procesos que las modelan (como la erosión, el transporte y la deposición de materiales) y los factores que influyen en su formación, entre los que se encuentran los factores naturales como el clima, litología (tipo de rocas), estructura geológica, pendiente, vegetación y procesos internos (tectónica, sismicidad); los factores antrópicos tales como, deforestación, construcción de caminos, minería o urbanización.

Morfodinámica

La construcción de un inventario de procesos morfodinámicos es de suma importancia para el desarrollo de los modelos estadísticos de susceptibilidad, pues son considerados la variable dependiente y es la que condiciona el entrenamiento o calibración del modelo para que este pueda definir que categoría de cada variable tiene mayor área afectada por deslizamiento y por lo tanto es más susceptible a la ocurrencia de los mismos mientras que las variables condicionantes pueden variar según el estudio o análisis exploratorio de variables, esta es una constante para cualquier modelo de susceptibilidad.

Se tiene entonces las siguientes fuentes:

a. Reportes según DAGRD – SIATA
b. Reportes según el Departamento Administrativo de Planeación (DAP)

Ambas fuentes fueron filtradas y complementadas por la Universidad EAFIT mediante trabajos de fotointerpretación multitemporal entre los años 2005 al 2025 y recopilación del levantamiento de inestabilidades recientes.

En la Ilustración 87, se muestra espacialmente, cada una de las variables utilizadas en el modelamiento.

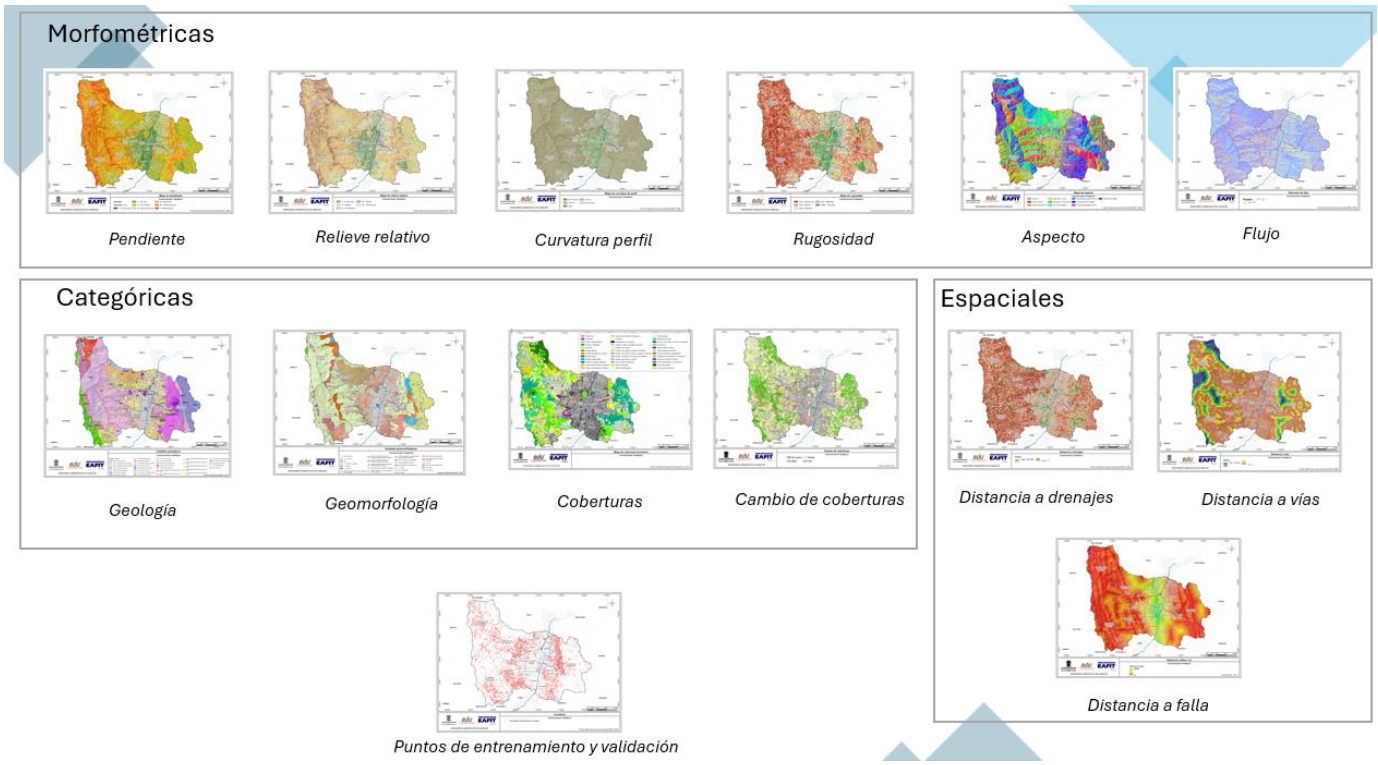


Ilustración 87. Variables utilizadas en el modelo

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

7.3.1.2 Descripción de los métodos estadísticos

Para construir y validar un modelo de susceptibilidad por movimientos en masa en el distrito de Medellín además de las metodologías expuestas en anteriores capítulos se evaluaron las siguientes metodologías con enfoques cuantitativos: Peso de la Evidencia (WoE), Regresión Logística (RL), Random Forest (RF) y Valor de la Información (VI).

Para los modelos de RL y RF se separaron los inventarios en conjuntos para entrenamiento y validación, preservando independencia espacial/temporal; para entrenamiento se utilizó el 80% de los datos y se reservó el 20% para la validación y construcción de curvas ROC/AUC. Para los modelos WoE y VI se utiliza la totalidad de los datos y se construye la curva ROC/AUC a partir del ordenado de los datos de mayor a menor y el cálculo de la sensibilidad y especificidad. Las variables categóricas se discretizaron mediante pesos de evidencia para los modelos de RL Y RF.

Para la generación de los mapas de susceptibilidad y su zonificación (Alta/Media/Baja), se utilizaron las probabilidades del 30 a 40% para baja, 30-70% para media y mayor 70% para la categoría alta.

7.3.1.3 Análisis exploratorio de datos y selección de variables

Para asegurar buenos resultados se revisó, depuro y seleccionaron variables del entrenamiento para los diferentes métodos; para esto, se realizó un análisis exploratorio de los datos, se realizaron histogramas y la matriz de correlación de Sperman con el fin de observar qué variables se encontraban correlacionadas para evitar multicolinealidad y sobrestimación de coeficientes.

Como resultados relevantes de este análisis se encuentra variables dependientes con fuerte correlación > 0.5 ejemplo pendiente (*Slope*) y relieve relativo (Rel-rel) lo que hace necesario su exclusión para evitar sobreajuste. Igual pasa cobertura vegetal y cambio de cobertura, por lo anterior no se usan en los modelos simultáneamente por su alta correlación.

Variables como flujo y aspecto están poco relacionadas con las otras variables y en los resultados finales algunas de ellas no tienen un peso relevante u aporte significativo en la predicción (Ilustración 88).

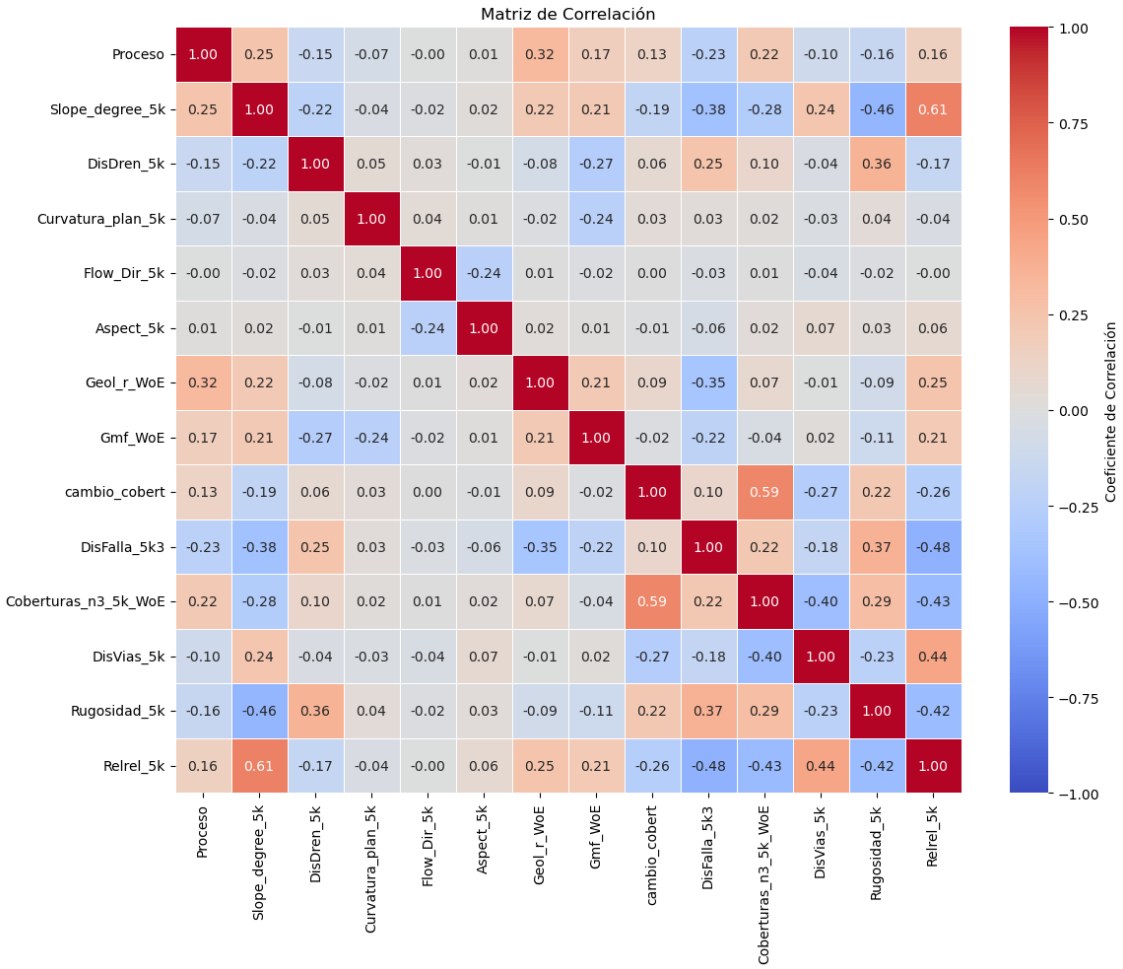


Ilustración 88. Ejemplo de matriz de correlación de Sperman evaluadas

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Luego del análisis exploratorio de las variables, se procede a estimar los modelos de susceptibilidad, teniendo en cuenta que esta se define como la disposición propia de los terrenos para presentar movimientos en masa, la cual, a escalas intermedias, puede ser evaluada a partir de diferentes métodos estadísticos bivariados y multivariados, entre los que se encuentra el método estadístico Peso de la Evidencia (*Weight of Evidence*), método de radio de frecuencia (*Frequency Ratio Method*), método del índice estadístico (*The statistical index method*), análisis discriminante y regresión logística, *random forest*, ampliamente utilizados en el análisis de la susceptibilidad. A continuación, se describen los modelos estadísticos utilizados en el proyecto:

Peso de la evidencia (*Weight of Evidence*)

El peso de la evidencia analiza patrones de asociación entre los factores condicionantes (evidencias) y las áreas inestables mediante pesos. El peso de cada factor se calcula aplicando un enfoque bayesiano que considera la probabilidad incondicional y condicional de que ocurra un movimiento en masa (SGC, Servicio Geológico Colombiano, 2017).

En términos generales, dado que existe la probabilidad previa, conocida como incondicional, se calcula con los mismos tipos de movimientos en masa que ocurrieron en el pasado en un periodo determinado y puede ser modificada de modo que al agregar una nueva evidencia la probabilidad cambia y se genera entonces una probabilidad posterior llamada también probabilidad condicionada. La probabilidad posterior se obtiene de la sumatoria de los pesos de cada factor (SGC, Servicio Geológico Colombiano, 2017).

Los pesos son asignados basados en la relación de los factores condicionantes (como la geología, las pendientes, la rugosidad, el relieve relativo, la cercanía a vías, cercanía a drenajes y la cobertura terrestre) con la frecuencia de los 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 la clase analizada no es de interés para el fenómeno por movimiento en masa.

Regresión logística

Este modelo, estima la relación entre una variable dependiente (la ocurrencia de movimientos en masa) de valores dicotómicos de 0 (no ocurrencia) y 1 (si ocurrencia), con un grupo de variables independientes, en este caso las variables condicionantes del terreno. La ventaja de este modelo 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. La relación de dependencia entre la ocurrencia de movimientos en masa y las variables es expresada así:

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

donde

- $P(y)$: Probabilidad especial estimada de la ocurrencia de movimientos en masa (entre 0 y 1)
- z: combinación lineal de las variables independientes

$$z = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_n x_n$$

- b_0: Intercepto
- b_i: coeficientes de la regresión
- x_i: variables independientes

Random forest

El *Random Forest* (RF) es una mejora del método CART (Breiman, 2001) que entrena muchos árboles de decisión sobre muestras aleatorias con reemplazo (*bootstrap*) y selecciona en cada nodo solo un subconjunto aleatorio de variables para buscar la mejor división.

En cada nodo de un árbol, en lugar de considerar todas las variables, se selecciona aleatoriamente un subconjunto de ellas y se elige la mejor división dentro de ese subconjunto. Los árboles se crecen hasta su tamaño máximo sin podarlos, y la predicción final se obtiene promediando los resultados de todos los árboles.

Para su aplicación se utiliza la biblioteca Sk-learn de Python 3.11.

Entre las ventajas para su uso está la robustez y capacidad predictiva, validación eficiente, poder discriminantes y entrega de probabilidades de clasificación de procesos según las variables predictoras.

Valor de la información (aplicado a unidades de ladera y a dominio rasterizado)

Para este análisis se implementó el enfoque propuesto por Ciurleo, Calvello, y Cascini (2016), basado en el método del valor de la información (*Information Value Method*, IV), una técnica estadística bivariada que evalúa la relación entre la ocurrencia de deslizamientos (variable dependiente) y cada factor condicionante (variables independientes) de forma individual.

Cada variable independiente se discretiza en n clases basadas en cuantiles. A cada clase se le asigna un peso que refleja su capacidad predictiva, calculado mediante la siguiente fórmula:

$$W_{ij} = \log\left(\frac{D_{ij}}{D^*}\right) = \log\left(\frac{F_{ij}/N_{ij}}{F_{\text{tot}}/N_{\text{tot}}}\right)$$

Donde:

- W_{ij}: peso asignado a la clase j de la variable independiente V_i;
- D_{ij}: densidad de deslizamientos dentro de la clase j de V_i;
- D^*: densidad promedio de deslizamientos en el área de estudio;
- F_{ij}: número de deslizamientos que en la clase j de V_i;
- N_{ij}: número de UL en la clase j de V_i;
- F_{tot}: número total de deslizamientos en el área de estudio;
- N_{tot}: número total de UL en el área de estudio.

Pesos positivos indican una mayor asociación con la ocurrencia de deslizamientos, mientras que pesos negativos indican lo contrario. La suma de los pesos asociados a cada clase de las variables independientes para una UL determina su índice de susceptibilidad.

Para la aplicación del método, se calcularon estadísticas representativas de las variables condicionantes continuas dentro de cada UL; en este caso, se utilizó la mediana de los valores de píxeles. Las variables independientes consideradas fueron de carácter morfométrico e hidrológico: aspecto, curvatura plana, curvatura de perfil, elevación, rugosidad, pendiente y distancia a los drenajes. Un ejemplo de la representación de la variable pendiente en las UL se presenta en la Ilustración 89.

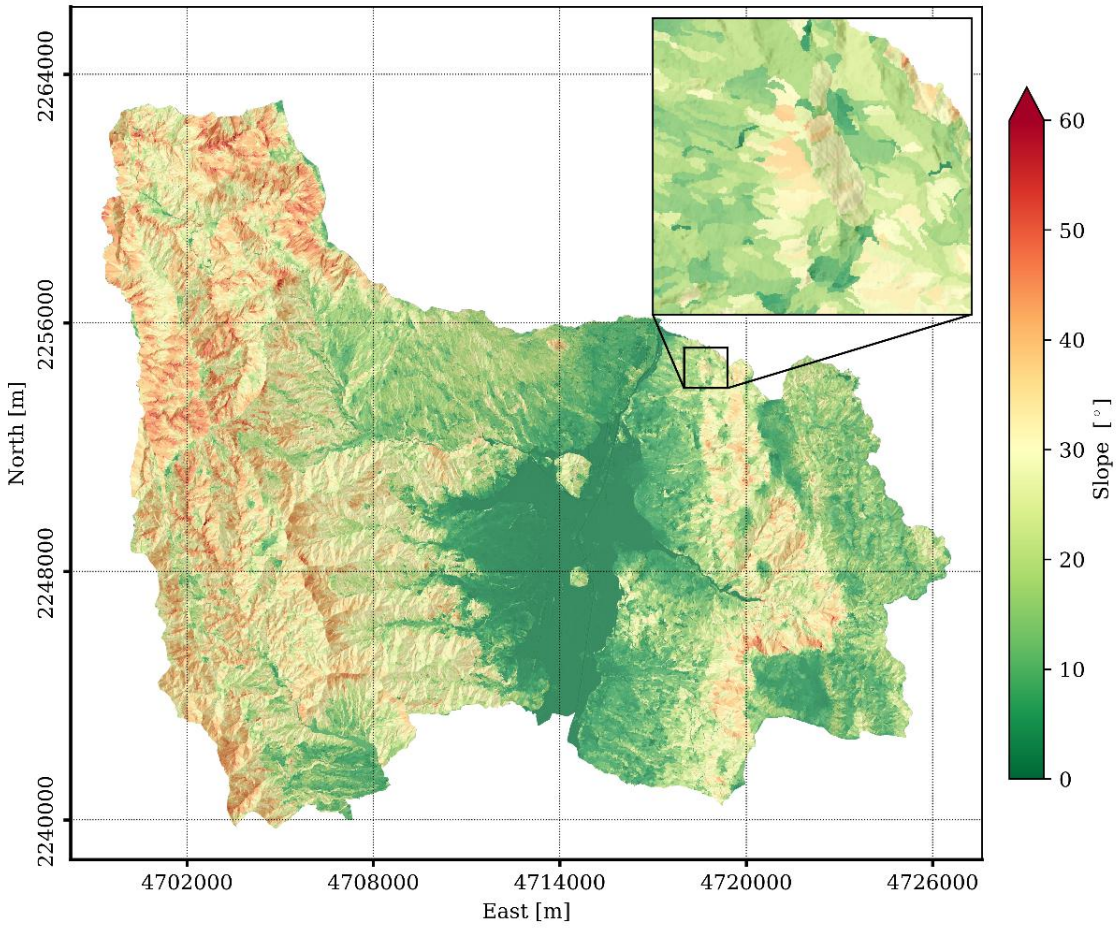


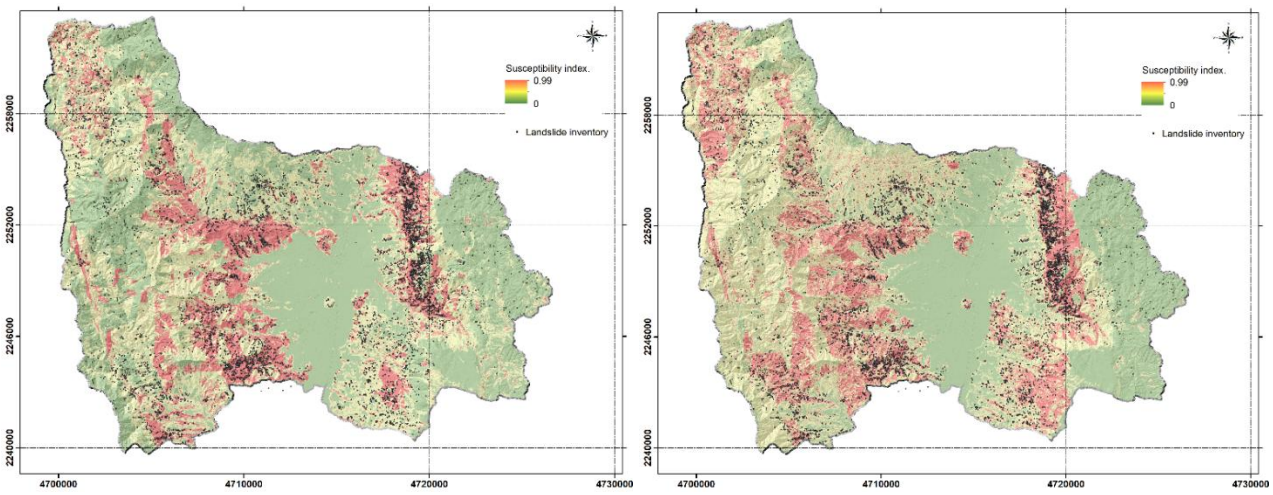
Ilustración 89. Asociación de pendientes a cada unidad de ladera en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Adicionalmente, se incluyeron como factores condicionantes las variables categóricas: cobertura del suelo, geología y geomorfología. En el caso particular de la geología, debido al alto número de clases (32 unidades geológicas), se realizó una agrupación temática que redujo el número de clases a $n = 11$, tal como se detalla en la Tabla 22. Las demás variables categóricas ya presentaban un número de clases inferior o adecuado para el análisis. Por su parte, las variables continuas fueron discretizadas en 11 clases basadas en cuantiles.

7.3.1.4 Índice de susceptibilidad peso de la evidencia

La Ilustración 90 presenta la distribución espacial del índice de susceptibilidad por movimientos en masa estimado mediante el peso de la evidencia para el Distrito de Medellín.



a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

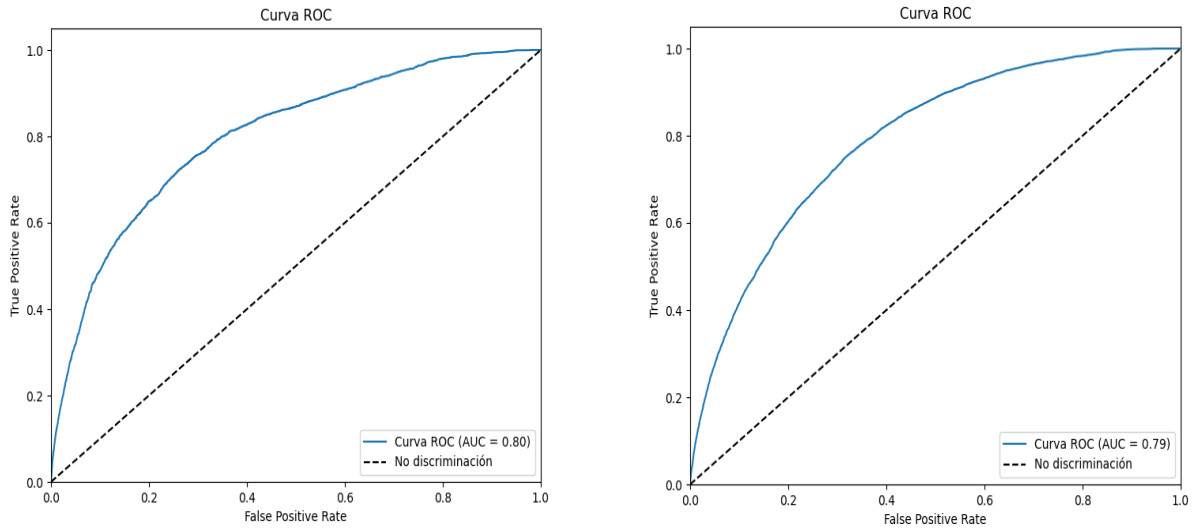
Ilustración 90. Índice de susceptibilidad por movimientos en masa en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Al utilizar el inventario del DAP se afecta con susceptibilidad media la zona occidental del distrito, la cual con el inventario del DAGRD- SIATA queda entre categorías baja y media.

7.3.1.5 Validación de la susceptibilidad por peso de la evidencia

La Ilustración 91 presenta las curvas ROC correspondientes al conjunto de validación, obtenidas para los inventarios DAGRD–SIATA con un AUC del 80 % y del 79% para el inventario DAP.



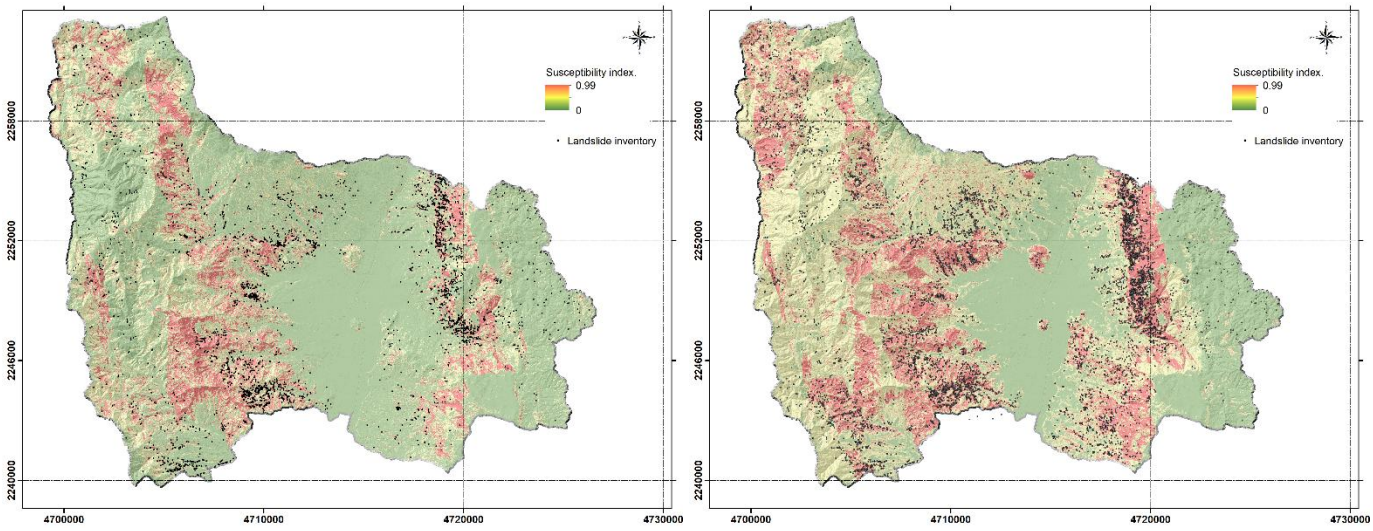
a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

Ilustración 91. Curva ROC del modelo de peso de la evidencia

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

7.3.1.6 Índice de susceptibilidad por regresión logística

La Ilustración 92 presenta la distribución espacial del índice de susceptibilidad estimado para el Distrito de Medellín.



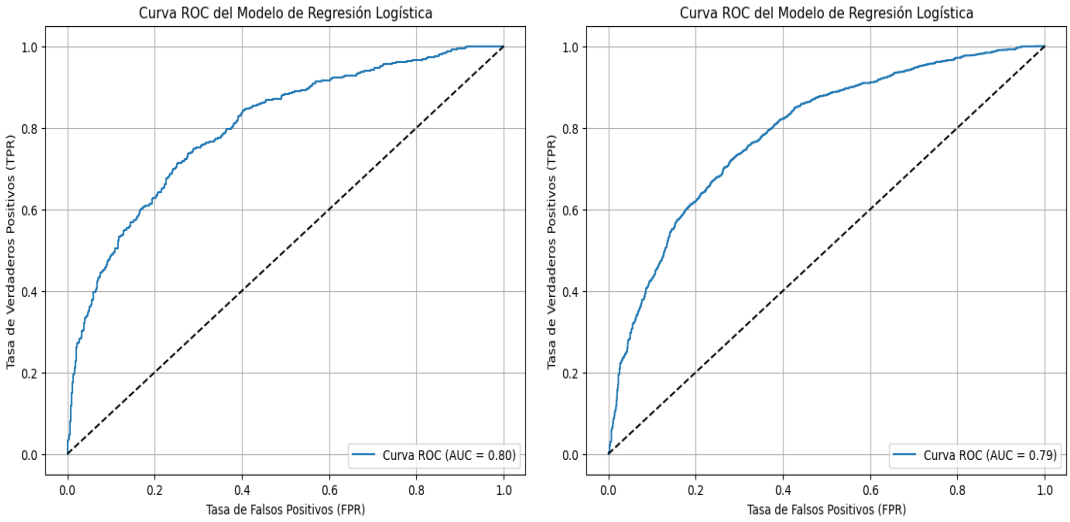
a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

Ilustración 92. Índice de susceptibilidad por movimientos en masa en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

7.3.1.7 Validación de la susceptibilidad por movimientos en masa para regresión logística

La Ilustración 93 presenta las curvas ROC correspondientes a los modelos de regresión logística



a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

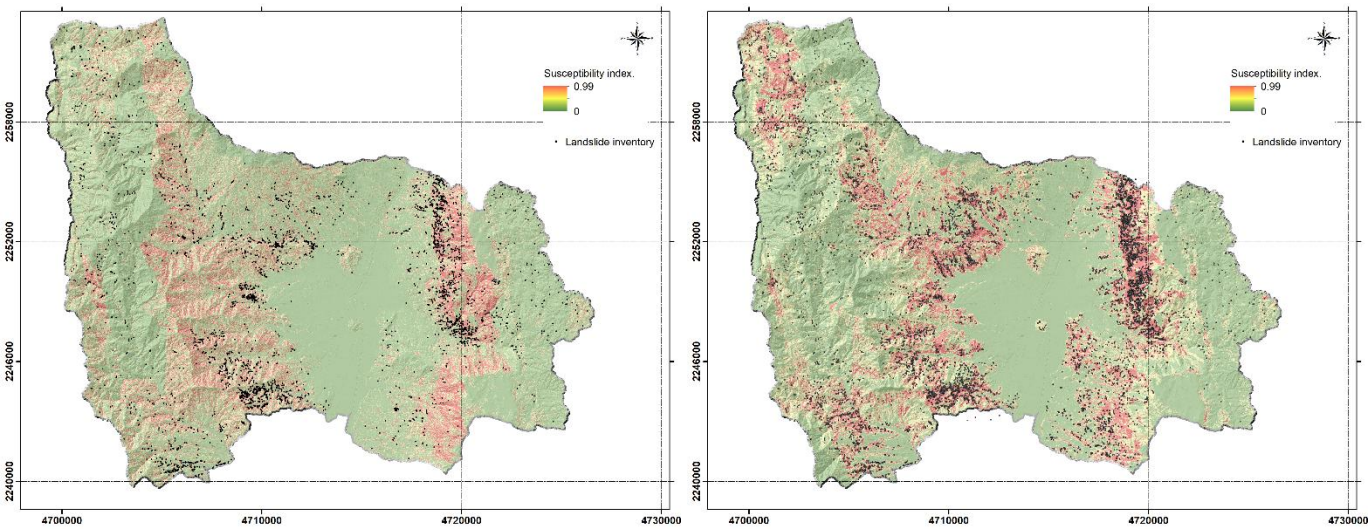
Ilustración 93. Curva ROC del modelo de regresión logística

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Los modelos de regresión logística evaluados tienen un buen poder predictivo. El valor de AUC de 80% y 79% confirman que son eficaces para distinguir entre pixeles con procesos y sin procesos.

7.3.1.8 Índice de susceptibilidad Random Forest

La Ilustración 94 presenta la distribución espacial del índice de susceptibilidad estimado para el Distrito de Medellín.



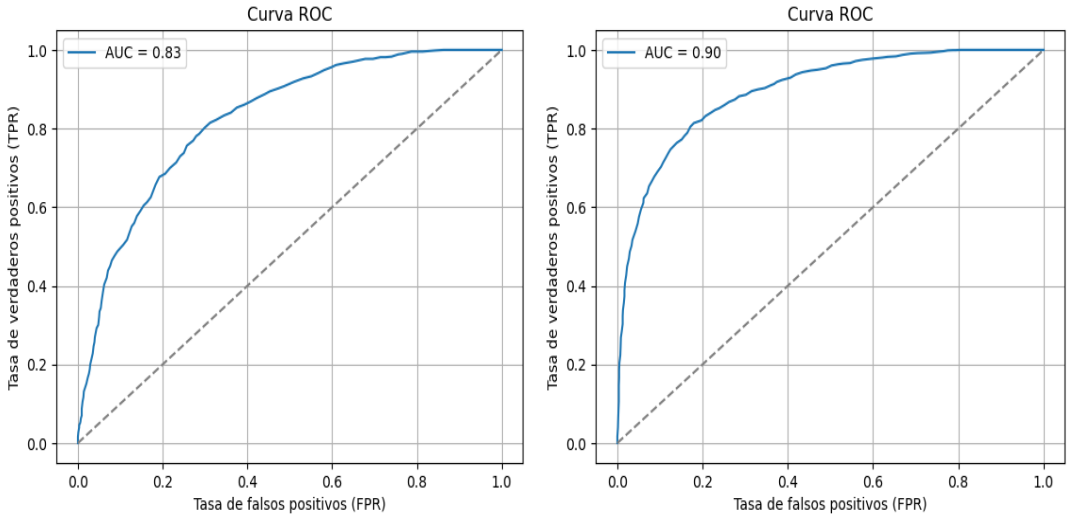
a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

Ilustración 94. Índice de susceptibilidad por movimientos en masa en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

7.3.1.9 Validación de la susceptibilidad para Random Forest

La Ilustración 95 presenta las curvas ROC correspondientes al modelo RF.



a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

Ilustración 95. Curva ROC del modelo de random forest

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

La Ilustración 95 muestra las curvas de éxito del modelo, 83% y 90% las más altas encontradas de los tres métodos.

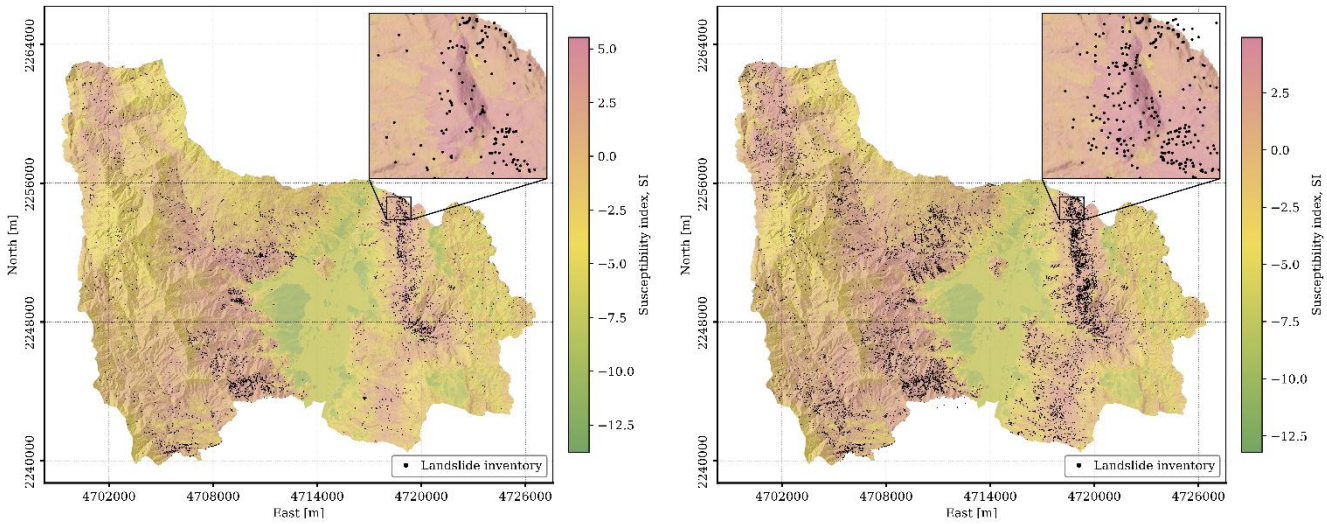
En términos generales, las distintas metodologías presentan una tendencia consistente a clasificar adecuadamente los datos, alcanzando desempeños entre el 79 % y el 90 %. Todos los modelos evidencian una alta susceptibilidad en sectores específicos como la zona alta de la comuna 1 (Santo Domingo), comuna 3 (Manrique), comuna 13 (San Javier), parte alta de la comuna 14 (El Poblado), así como en los corregimientos de San Antonio de Prado, San Sebastián de Palmitas y San Cristóbal.

La mejor relación espacial encontrada corresponde al modelo logístico, el cual presenta buena transición según la variable pendiente, resaltando los cambios entre el valle y la ladera, también otorgando coeficientes de mayor peso para variables como la geología, geomorfología y coberturas, esto se traduce en polígonos homogéneos, compactos y con menor dispersión en comparación con el modelo estadístico de *Random forest*.

La calidad y densidad del inventario utilizado es un factor determinante para el rendimiento de estos modelos. Esto se evidencia al emplear el inventario histórico del DAP, cuya mayor densidad permite que los modelos predictivos superen el área clasificada como de amenaza media y alta en comparación con los resultados obtenidos al utilizar el inventario DAGRD–SIATA.

7.3.1.10 Índice de susceptibilidad Valor de la Información

Una vez asignadas las medianas de las variables independientes a cada UL, se procedió al cálculo del índice de susceptibilidad por movimientos en masa, cuya distribución espacial se presenta en la Ilustración 96. Se observa que los valores más altos del índice tienden a concentrarse en UL con mayor densidad de deslizamientos, como es el caso cuando se superpone el inventario del DAP.

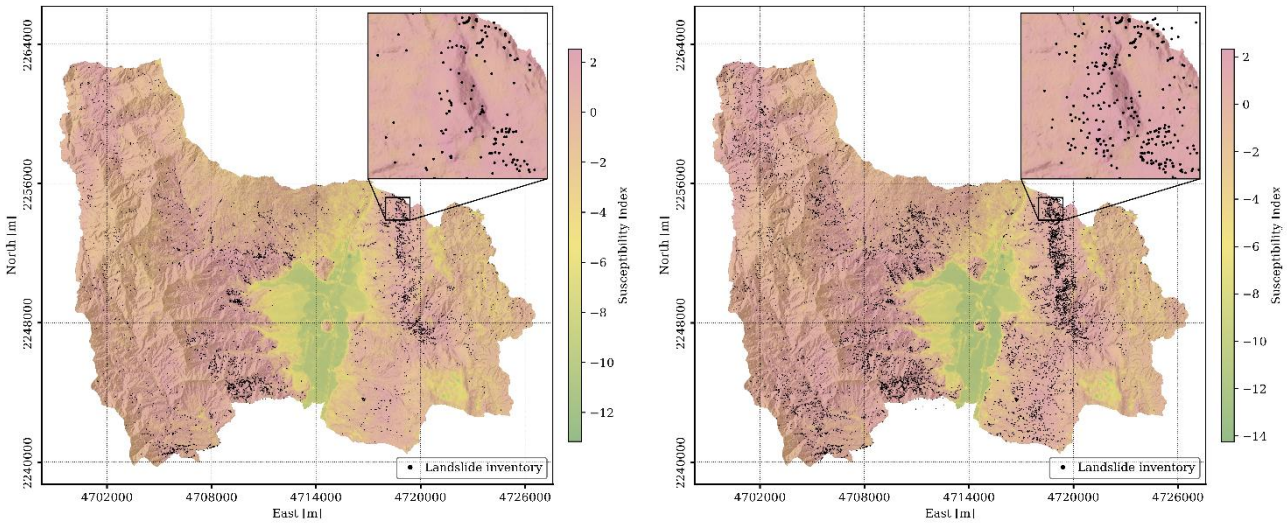


a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

Ilustración 96. Índice de susceptibilidad por movimientos en masa a partir de UL en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Adicionalmente, el índice de susceptibilidad por movimientos en masa para el Distrito de Medellín también se estimó aplicando el enfoque estadístico, pero directamente a nivel de píxel. Los resultados obtenidos se presentan en la Ilustración 97.



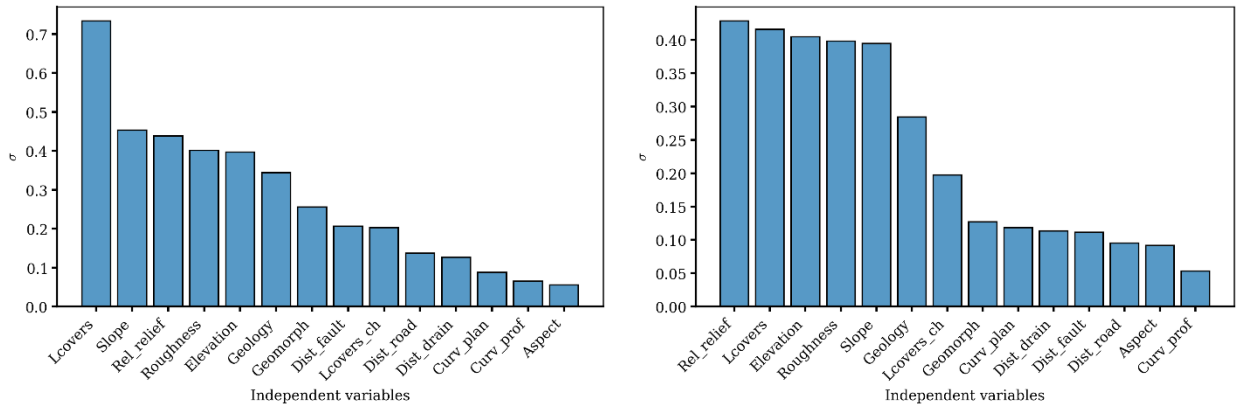
a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

Ilustración 97. Índice de susceptibilidad por movimientos en masa a partir de píxeles en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

7.3.1.11 Métricas del análisis de susceptibilidad Valor de la Información

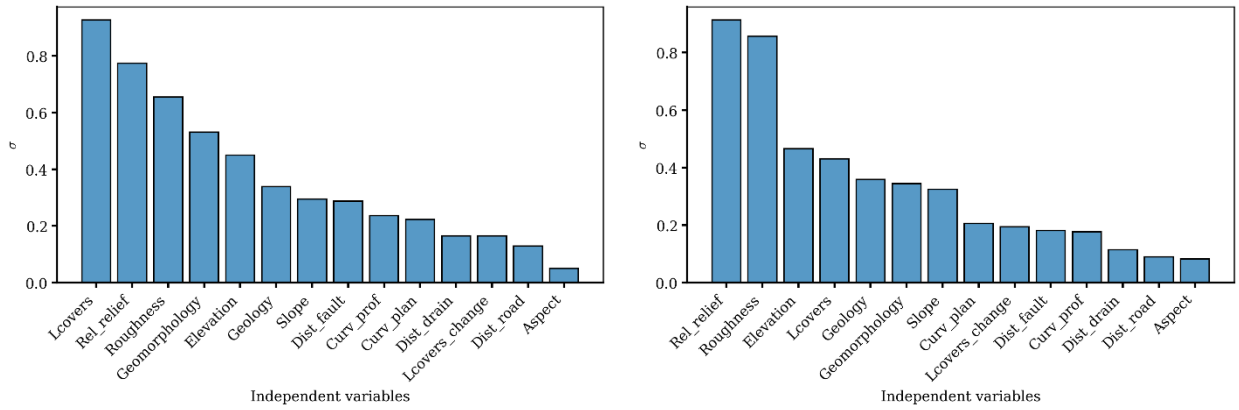
La Ilustración 98 y la Ilustración 99 presentan el índice de desviación estándar bivariado [σ], un indicador estadístico que evalúa la capacidad discriminante de los pesos asignados a las clases de cada variable independiente. Este índice se muestra de forma comparativa para los resultados del modelo estadístico implementado con UL y con píxeles, con el objetivo de analizar las diferencias en la estimación de la susceptibilidad en función del insumo espacial (UL o píxeles) y del inventario utilizados (DAGRD–SIATA o DAP).



a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

Ilustración 98. Indicador de la capacidad discriminante de los pesos asignados a las clases de variables independientes con UL

Fuente: Universidad EAFIT, 2025



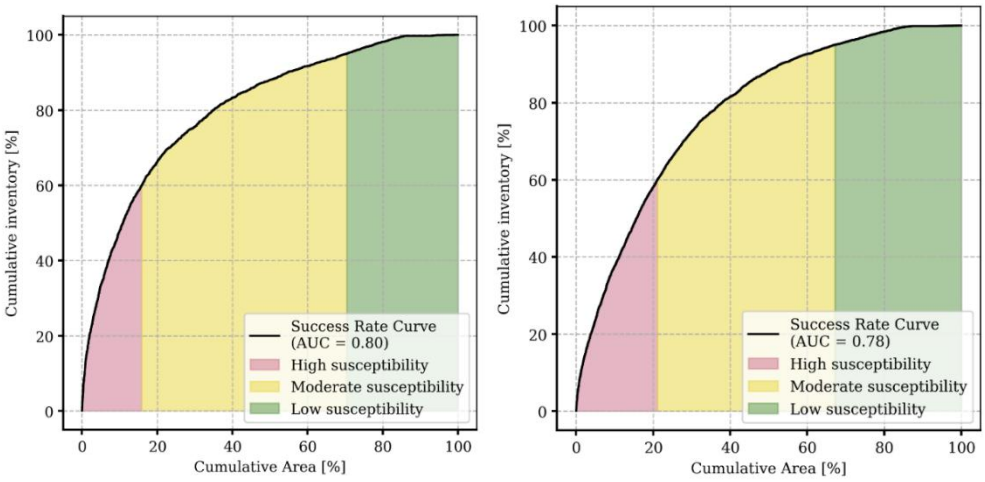
a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

Ilustración 99. Indicador de la capacidad discriminante de los pesos asignados a las clases de variables independientes con píxeles

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Por otro lado, la Ilustración 100 y la Ilustración 101 presentan las curvas de éxito y los respectivos valores del área bajo la curva (AUC), utilizadas para evaluar el desempeño predictivo de cada uno de

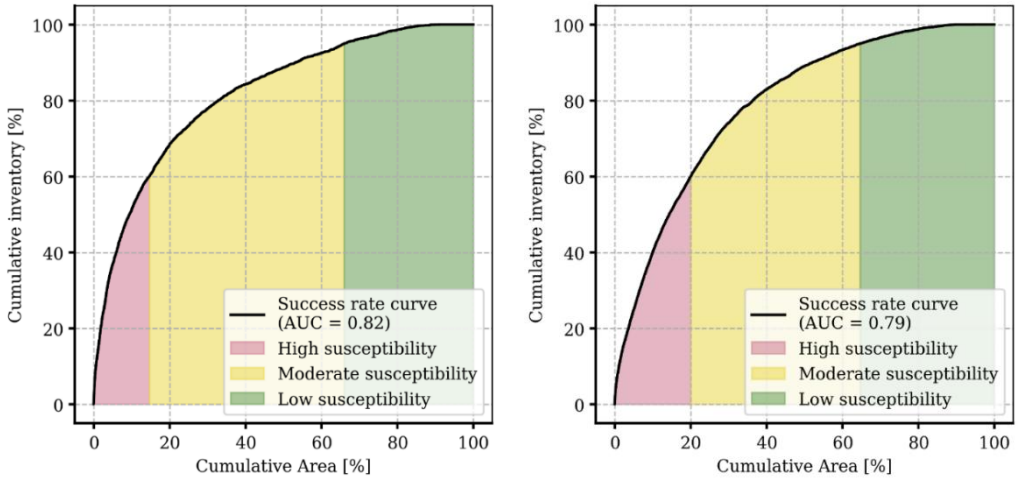
los escenarios analizados en el modelo estadístico. Los resultados indican un nivel de desempeño satisfactorio en los cuatro casos evaluados, siendo el modelo basado en UL con el inventario del DAP el de menor rendimiento (78%), y el modelo basado en píxeles con el inventario DAGRD–SIATA el de mejor desempeño (81%). Estos resultados respaldan el uso del índice de susceptibilidad como base para la propuesta de zonificación, en la cual se definieron tres categorías: baja (< 5%), moderada (5%–60%) y alta (> 60%), de acuerdo con el porcentaje de deslizamientos contenidos en cada clase.



a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

Ilustración 100. Curva de éxito, área bajo la curva y delimitación de umbrales para la zonificación por UL

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

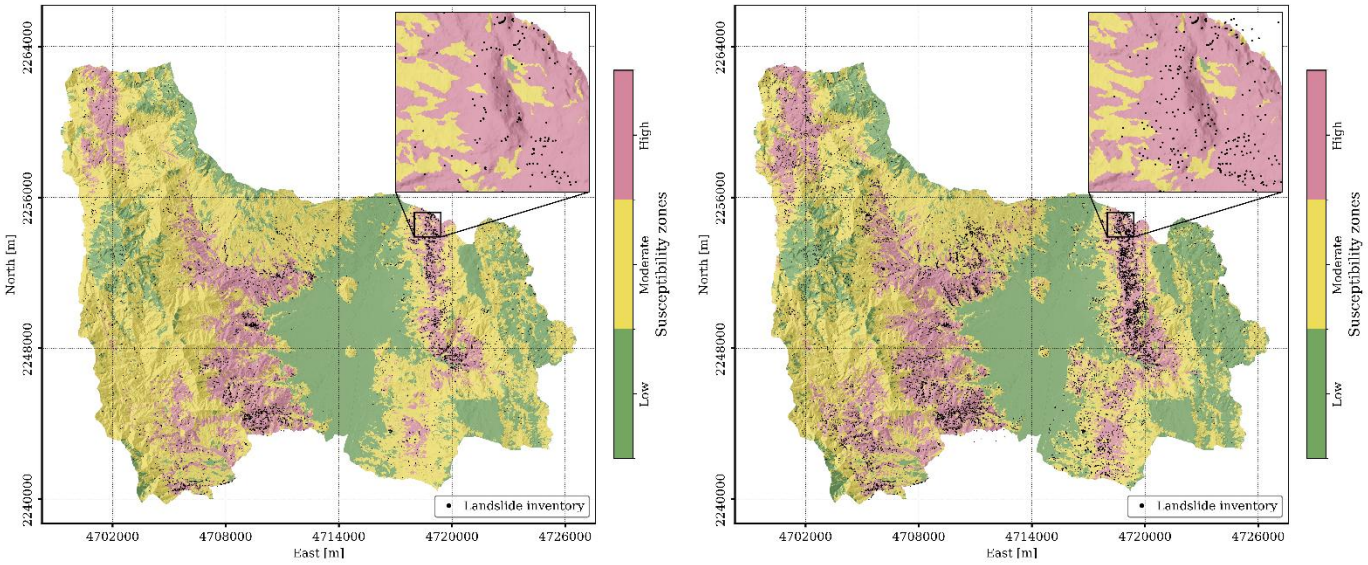


a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

Ilustración 101. Curva de éxito, área bajo la curva y delimitación de umbrales para la zonificación por píxeles

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

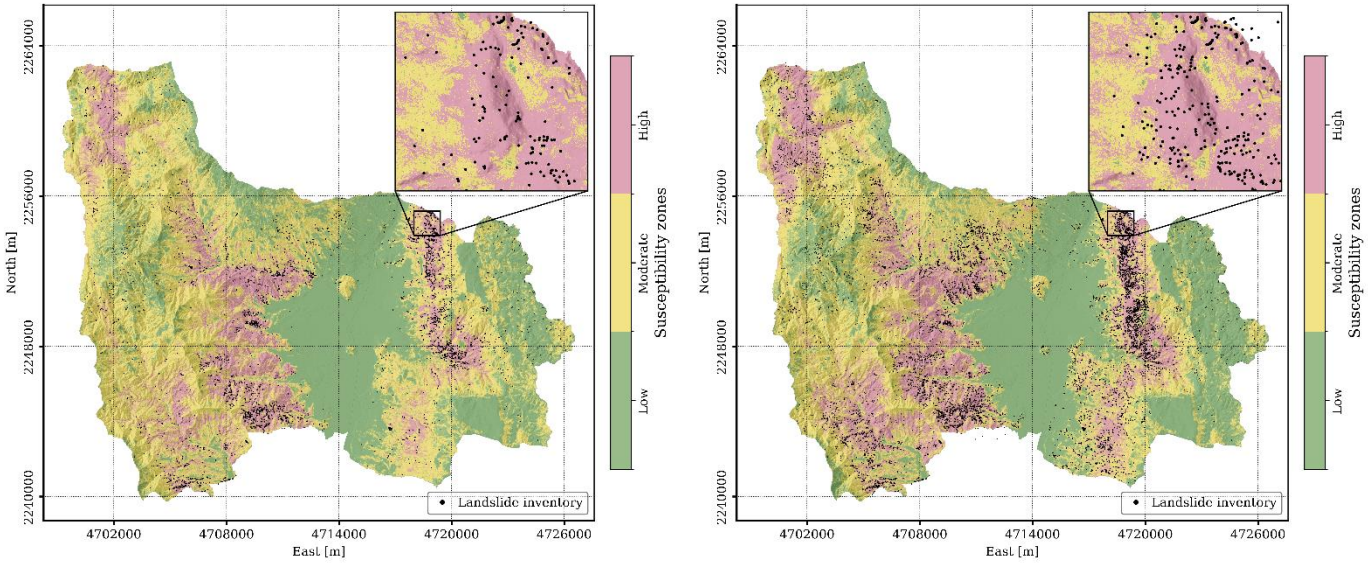
Finalmente, con base en los resultados anteriores, la Ilustración 102 y la Ilustración 103 muestran la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa para el Distrito de Medellín.



a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

Ilustración 102. Zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa por UL en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025



a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

Ilustración 103. Zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa por píxeles en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

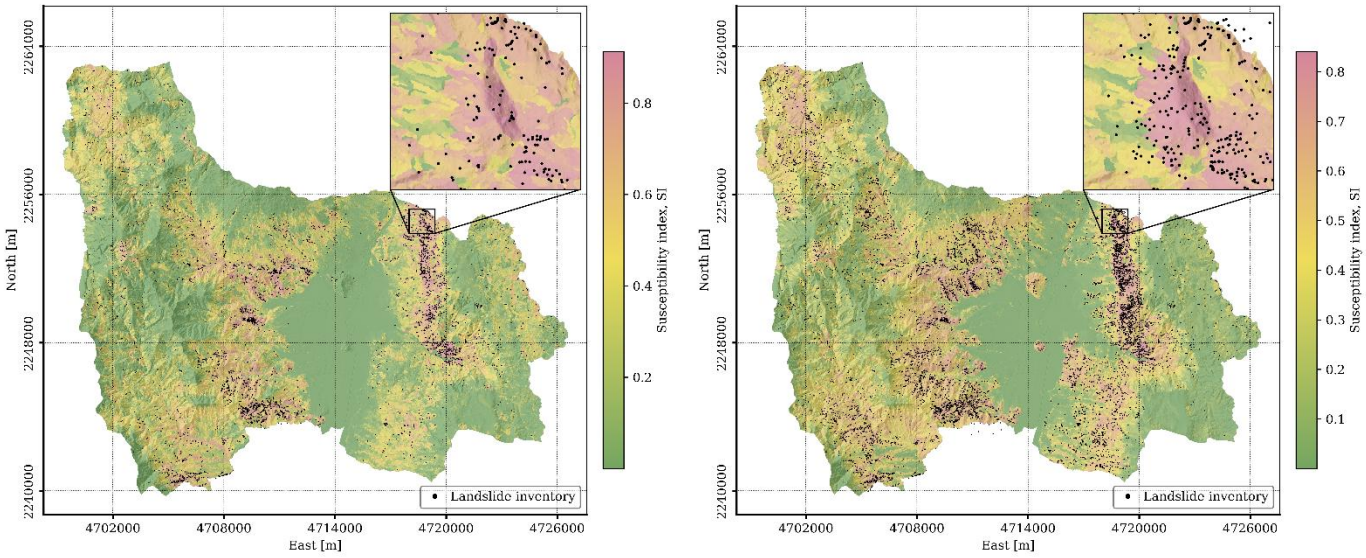
7.3.2 Modelo de red neuronal

Para este análisis se desarrolló un modelo de red neuronal artificial (ANN, por sus siglas en inglés) orientado a la estimación de la susceptibilidad por movimientos en masa a nivel de UL considerando los mismos insumos usados en los modelos estadísticos.

Del total de las UL generadas, se separó aleatoriamente un 30 % (aproximadamente 30.000 UL) como muestra de validación, mientras que el 70% restante se utilizó para entrenar el modelo. El desempeño predictivo se evaluó mediante la curva ROC, calculado a partir de las predicciones sobre la muestra de validación. Posteriormente, el modelo se reentrenó utilizando la totalidad de las UL, generando así la curva de éxito, la cual se empleó como insumo para la zonificación de la susceptibilidad.

7.3.2.1 Índice de susceptibilidad

La Ilustración 104 presenta la distribución espacial del índice de susceptibilidad estimado para el Distrito de Medellín.



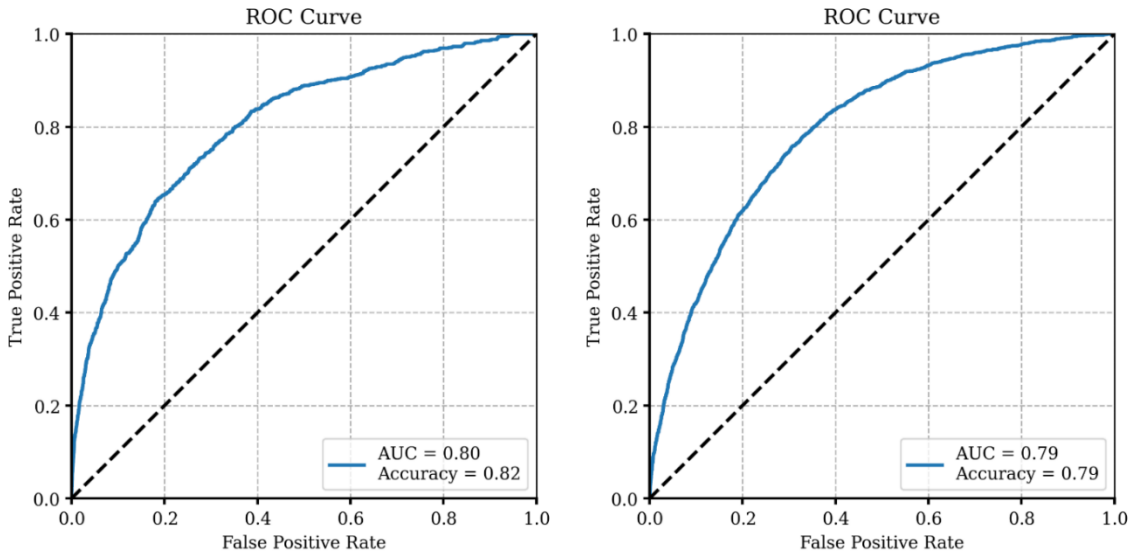
a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

Ilustración 104. Índice de susceptibilidad por movimientos en masa a partir de UL en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

7.3.2.2 Zonificación de la susceptibilidad

La Ilustración 105 presenta las curvas ROC correspondientes al conjunto de validación (30 % de las UL), obtenidas para los inventarios DAGRD–SIATA y DAP, ambas con un AUC del 80 %, y precisiones del 96 % y 91 %, respectivamente.

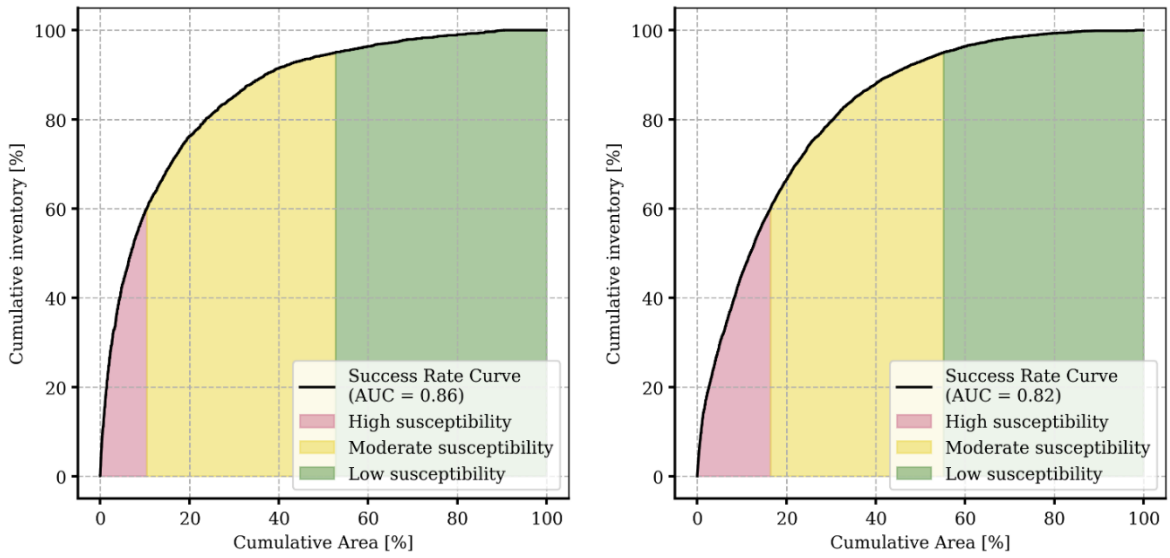


a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

Ilustración 105. Curva ROC del modelo de red neuronal para UL

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

La Ilustración 106 muestra las curvas de éxito del modelo, calculadas luego de reentrenar el modelo con la totalidad de las UL, alcanzando un AUC del 85% para el inventario DAGRD–SIATA y del 84% para el del DAP. Estas curvas sirvieron como base para continuar con la zonificación de la susceptibilidad en tres categorías: baja (< 5 %), moderada (5 %–60 %) y alta (> 60 %), en función del porcentaje de deslizamientos contenidos en cada clase.

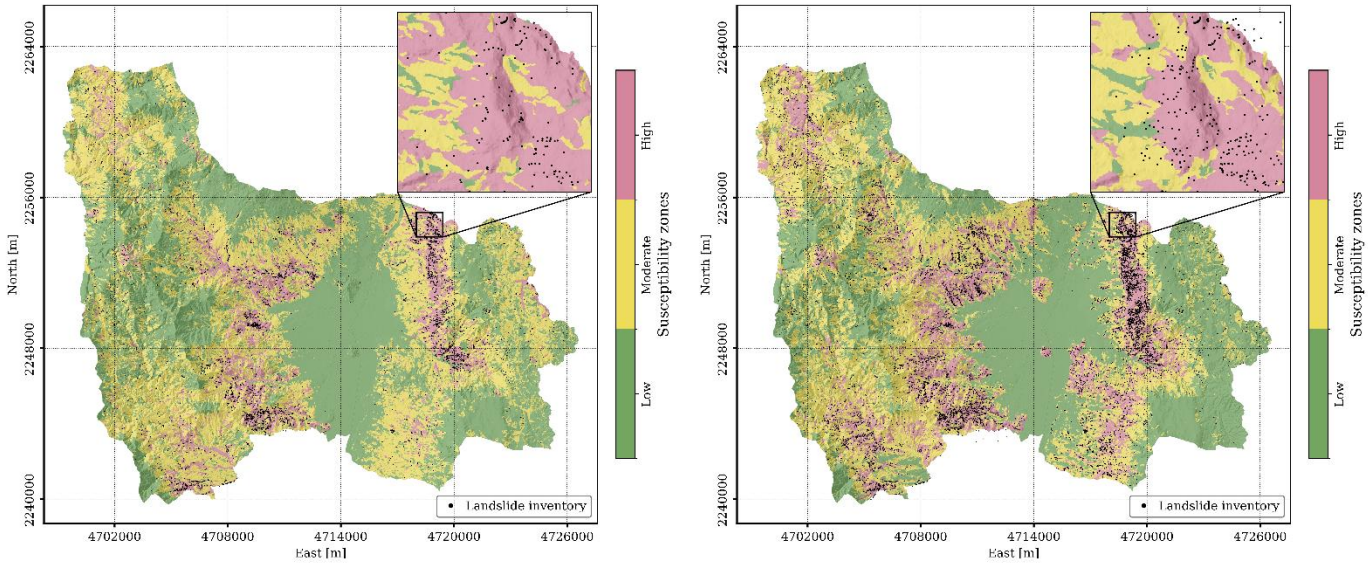


a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

Ilustración 106. Curva de éxito, área bajo la curva y delimitación de umbrales para la zonificación por modelación mediante red neuronal

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Finalmente, con base en estos resultados, la Ilustración 107 muestra la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa para el Distrito de Medellín.



a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

Ilustración 107. Zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa a partir de UL en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

7.3.3 Modelo en base física determinista

La evaluación mediante métodos en base física requiere insumos en forma de variables continuas, tanto espaciales como no espaciales. Para el caso del Distrito de Medellín, se utilizó el modelo TRIGRS, tal como se describe en el documento metodológico. Para el caso de la susceptibilidad, el análisis se basa en los resultados del modelo en el tiempo t_0, es decir, sin considerar el efecto del detonante. Las variables del modelo y los resultados del análisis se presentan a continuación.

7.3.3.1 Variables del modelo

Parámetros de geotécnicos

A partir del análisis exploratorio de datos presentado anteriormente, se definen los siguientes parámetros medios (μ) de resistencia (ϕ', c') y de peso unitario natural (γ) para las once (11) zonas geológico-geotécnicas definidas, así como sus coeficientes de variación (V) y de correlación (ρ) (Tabla 24)

Tabla 24. Compilado de parámetros geotécnicos y sus estadísticos descriptivos

Zona	$\mu_{\phi'}$	$V_{\phi'}$	$\mu_{c'}$	$V_{c'}$	μ_{γ}	V_{γ}	$\rho_{(\phi'-c')}$
1	33.5	0.215	30.2	0.817	17.8	0.072	-0.580
2	25.9	0.244	33.9	0.532	18.1	0.055	0.034
3	28.8	0.103	25.2	0.845	17.7	0.069	-0.072
4	29.5	0.246	23.7	0.823	18.1	0.155	-0.090
5	32.5	0.235	25.5	0.740	17.8	0.071	-0.411
6	34.6	0.231	31.1	0.638	16.4	0.056	-0.478
7	27.4	0.505	27.3	0.687	18.3	0.058	-0.581
8	27.2	0.296	13.2	1.078	17.0	0.080	-0.326
9	29.2	0.269	23.0	0.682	17.7	0.074	-0.164
10	23.3	0.182	36.8	0.988	16.3	0.041	-0.883
11	34.1	0.155	18.1	0.773	18.1	0.099	-0.406

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Profundidad máxima de rotura ($Z_{\max}$)

La profundidad máxima de rotura ($Z_{\max}$) es una variable crítica que representa la profundidad a la cual se espera que se inicie el mecanismo de rotura que desencadena el movimiento en masa. Su estimación es compleja, pues depende de múltiples factores, incluyendo las propiedades hidromecánicas del terreno y las características del detonante (por ejemplo, la intensidad y duración de la lluvia).

Para su estimación en el Distrito de Medellín se realizó un retroanálisis para las 11 zonas geológicas, utilizando información documentada en los inventarios. En este caso se calibraron los parámetros α y β de modelos exponenciales negativos de la forma $Z_{\max} = \alpha \exp(\beta\delta)$, siendo δ la inclinación del terreno. Esta calibración se realizó mediante optimización, maximizando el área bajo la curva de éxito del caso determinista del modelo de base física.

La Ilustración 108 muestra el ajuste exponencial entre $Z_{\max}$ y la pendiente del terreno para cada zona geológica. En general, se evidencia una relación negativa fuerte esperada por el modelo empírico usado: a mayor pendiente, menor profundidad de rotura. Este comportamiento es coherente con la morfología del Distrito, donde predomina un relieve abrupto. En consecuencia, la mayoría de los eventos pueden corresponder a movimientos de modera a poca profundidad. La Ilustración 108 muestra la distribución espacial de $Z_{\max}$ en el Distrito de Medellín.

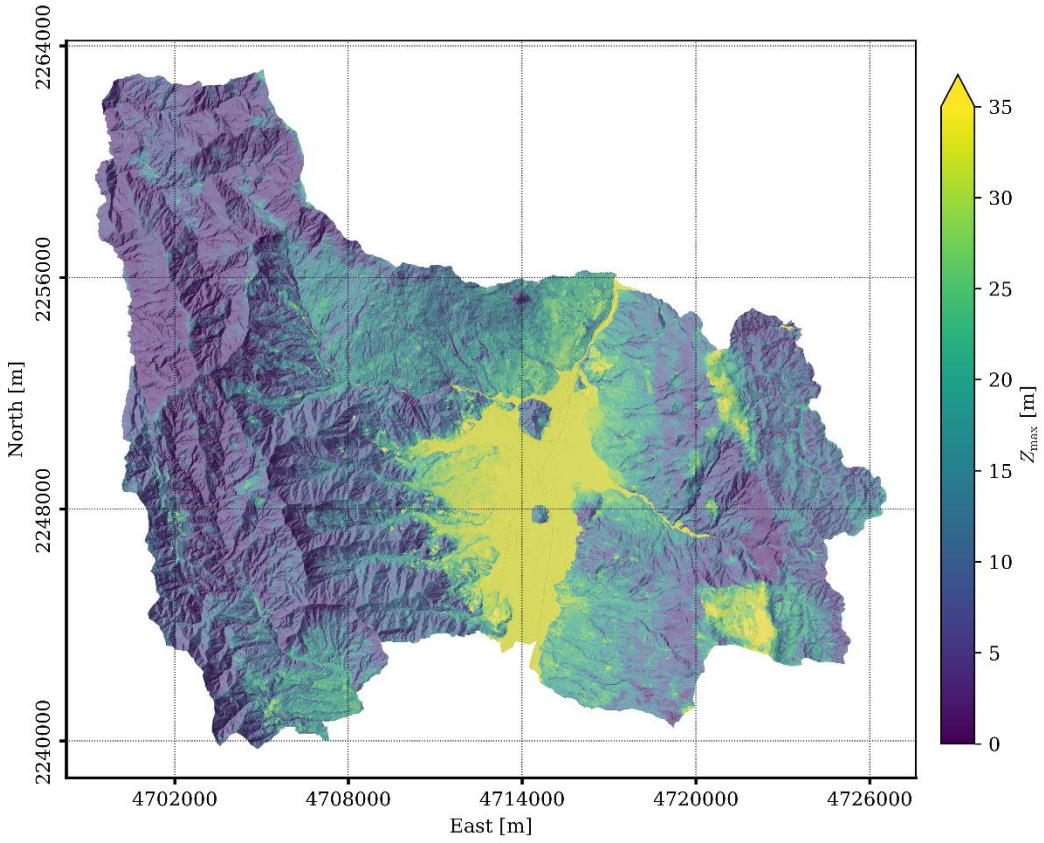


Ilustración 108. Distribución espacial de Z_{max} para un modelo exponencial empírico en el Distrito de Medellín

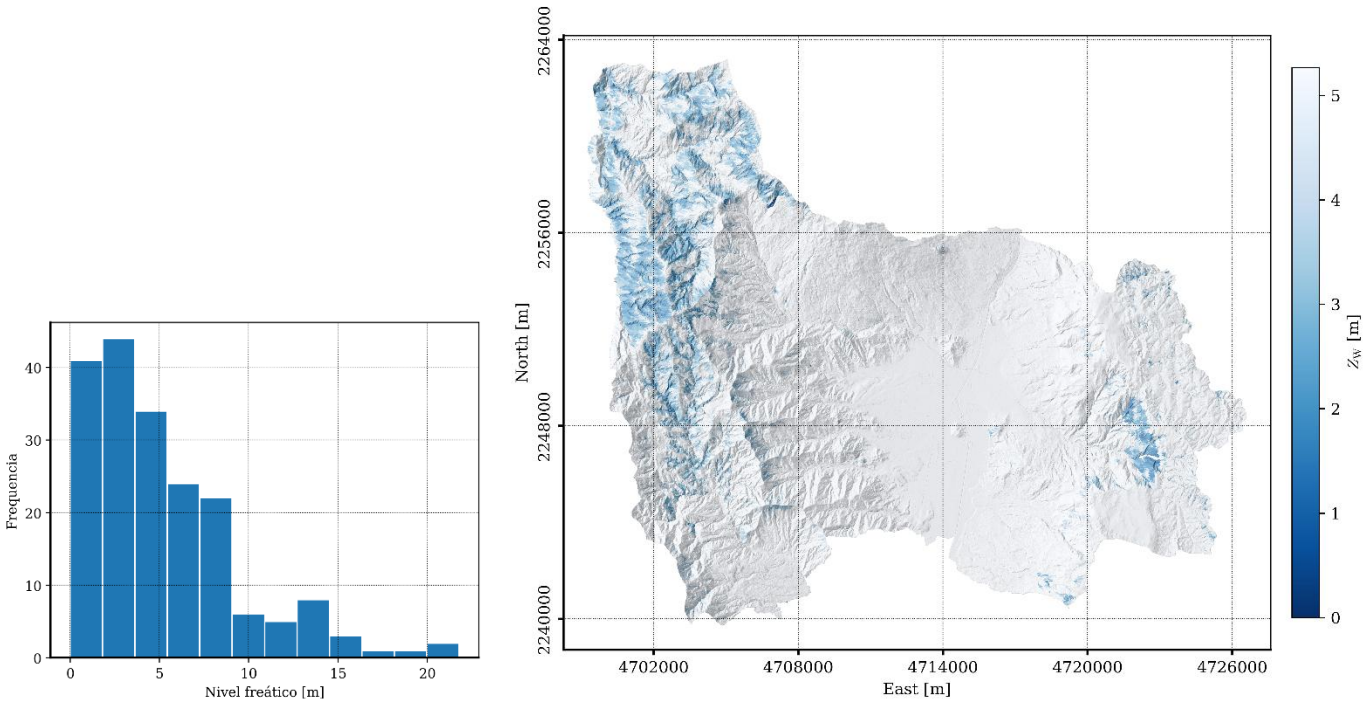
Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Profundidad del nivel freático (Z_w)

La profundidad del nivel freático (Z_w) se consideró como una variable condicionada en el espacio ya que la información disponible no permitió identificar una estructura espacial para interpolación. En este sentido se adopta el valor medio ($\mu_{Z_w} = 5.2$ m) de la distribución de valores (Ilustración 109a)

construida considerando información disponible incluso de sondeos por fuera del Distrito de Medellín y se adopta espacialmente la siguiente condición para Z_{w}, cuya visualización se presenta en la Ilustración 109b.

$$Z_{\mathrm{w}} = \begin{cases} \mu_{Z_{\mathrm{w}}}, & \mu_{Z_{\mathrm{w}}} < Z_{\max} \\ Z_{\max}, & \mu_{Z_{\mathrm{w}}} \geq Z_{\max} \end{cases}$$



a) Histograma de valores de nivel freático registrados en perforaciones

b) Distribución espacial de Z_w

Ilustración 109. Distribución espacial de Z_w implementado en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

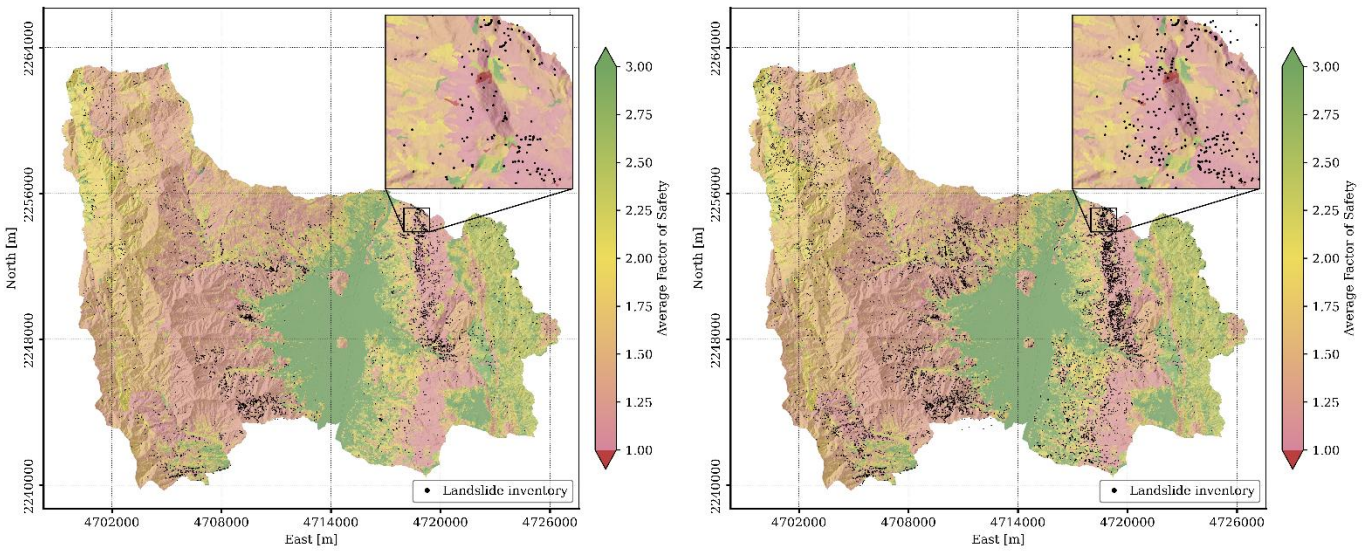
Pendientes (δ)

Esta variable fue descrita previamente en las variables de los modelos estadísticos.

7.3.3.2 Índice de susceptibilidad

Una vez definidos los insumos espaciales que representan los factores condicionantes del terreno, se ejecutó la modelación física de la condición de estabilidad para todo el Distrito. En este caso, el índice de susceptibilidad por movimientos en masa corresponde al inverso multiplicativo del factor de seguridad determinista, es decir, el que se obtiene con los parámetros geotécnicos medios por

cada zona geológico-geotécnica. La distribución espacial del factor de seguridad se presenta en la Ilustración 110.



a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

Ilustración 110. Índice de susceptibilidad por movimientos en masa en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

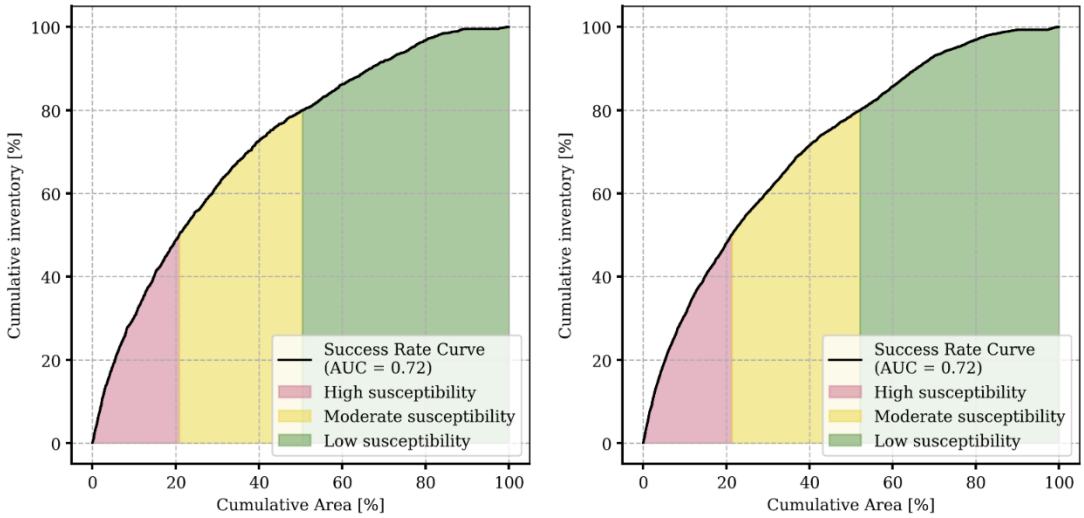
Espacialmente se observa una tendencia física razonable. El inventario de deslizamiento se concentra, en general, sobre las zonas con factores de seguridad más bajos, que a su vez coincide con corredores de ladera donde las pendientes superan los 25 o 30°. En el fondo del valle y a lo largo de superficies suaves (pendiente <15°) el factor de seguridad tiende a ser alto y con ausencia de deslizamientos, lo que respalda los resultados del modelo. No obstante, se observan algunos puntos del inventario dentro de zonas con factores de seguridad medios a altos (>1.4), lo cual se asocia a la incertidumbre y variabilidad de los insumos enmascarada en este análisis determinista. Por otro lado, zonas de alta pendiente con factores de seguridad bajo, cercanos al equilibrio limite (<1.15) podrían estar representando zonas de alta susceptibilidad con mayor predisposición a la ocurrencia de movimientos en masa en un futuro.

7.3.3.3 Zonificación de la susceptibilidad

La Ilustración 111 presenta las curvas de éxito y los valores del área bajo la curva (AUC) obtenidos para del modelo físico, calculados para ambos inventarios (DAGRD–SIATA y DAP). Los resultados muestran un desempeño satisfactorio, con un valor de AUC del 72% para ambos escenarios.

Para la zonificación de la susceptibilidad en este modelo, se mantuvieron las tres categorías, aunque con límites distintos a los definidos para el modelo estadístico. En este caso, los rangos se

establecieron de la siguiente manera: baja (< 5%), moderada (5%–50%) y alta (> 50%), con base en el porcentaje de deslizamientos contenidos en cada clase.

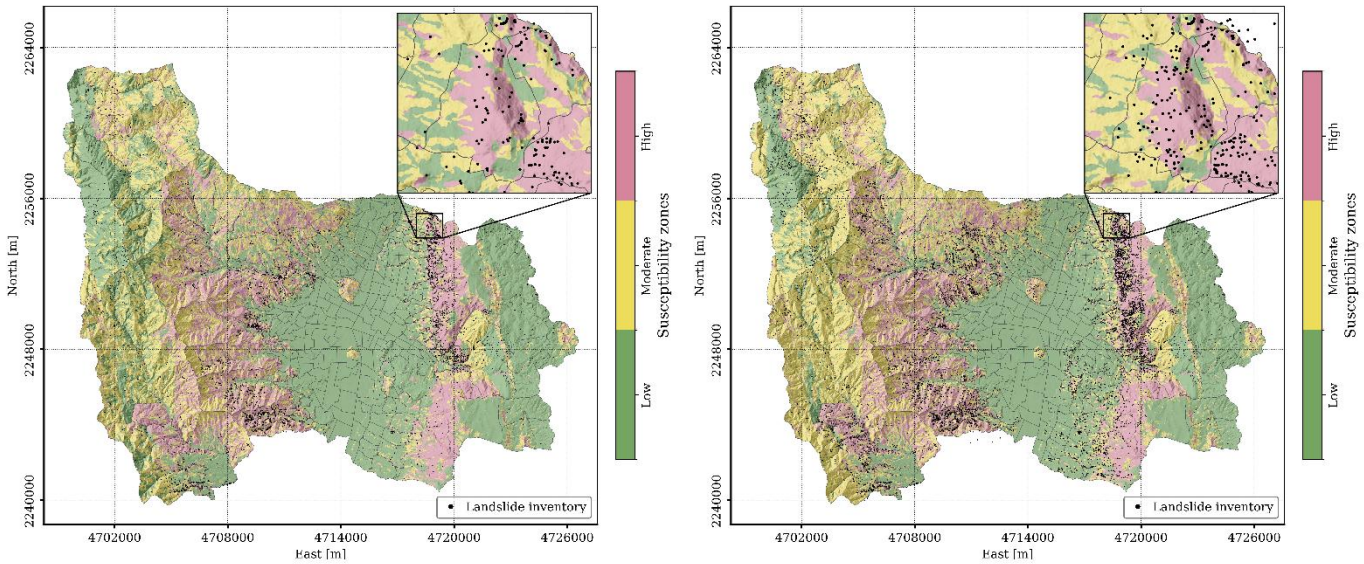


a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

Ilustración 111. Curva de éxito, área bajo la curva y delimitación de umbrales para la zonificación por modelación física

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Finalmente, con base en estos resultados, la Ilustración 112 muestra la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa para el Distrito de Medellín.



a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

Ilustración 112. Zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

7.4 ANÁLISIS DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

Una vez definida la susceptibilidad, esta se debe caracterizar con la frecuencia de ocurrencia de los tipos de movimientos en masa analizados. Idealmente se deberían conocer todos los movimientos en masa detonados por un mismo factor (lluvia o sismo) en una región determinada con el fin de definir la probabilidad temporal de ocurrencia de un movimiento en masa (SGC 2017).

Para la ventana de datos del presente estudio, no se incorpora el detonante sísmico ante la inexistencia de registros instrumentales de aceleraciones en el Distrito de Medellín que alcancen los umbrales comúnmente asociados a la activación de inestabilidades en laderas, por ejemplo, PGA del orden de 0.1–0.2 o mayor. Por otro lado, los inventarios existentes no registran históricamente movimientos en masa atribuibles a este detonante dentro del área de estudio. Finalmente, entre los pocos sismos regionales perceptibles y la ocurrencia de deslizamientos sísmicos locales nula, se tiene que los eventos de precipitación y la actividad antrópica explican en la práctica la totalidad de los eventos inventariados.

En consecuencia, y complementando con la imposibilidad de validar modelos numéricos físicos o estadísticos hipotéticos para el caso sísmico, se excluye de la evaluación de la amenaza sísmica de deslizamientos. No obstante, se establece un protocolo de revisión: si en el futuro se registran aceleraciones locales que superen los umbrales de activación o se documenten deslizamientos sísmicos en el Distrito de Medellín, se deberá incorporar esta componente en la próxima revisión de los Estudios Básicos.

Por lo anterior, en adelante se desarrollan los análisis para el factor detonante lluvia. Considerando que este corresponde a un periodo de retorno en específico (Tr = 25 años), los resultados de amenaza se refieren por lo tanto a la dimensión espacial del fenómeno, específicamente a las posibles zonas de rotura o iniciación de los deslizamientos, ya que la extensión de propagación de estos se aborda en una sección independiente.

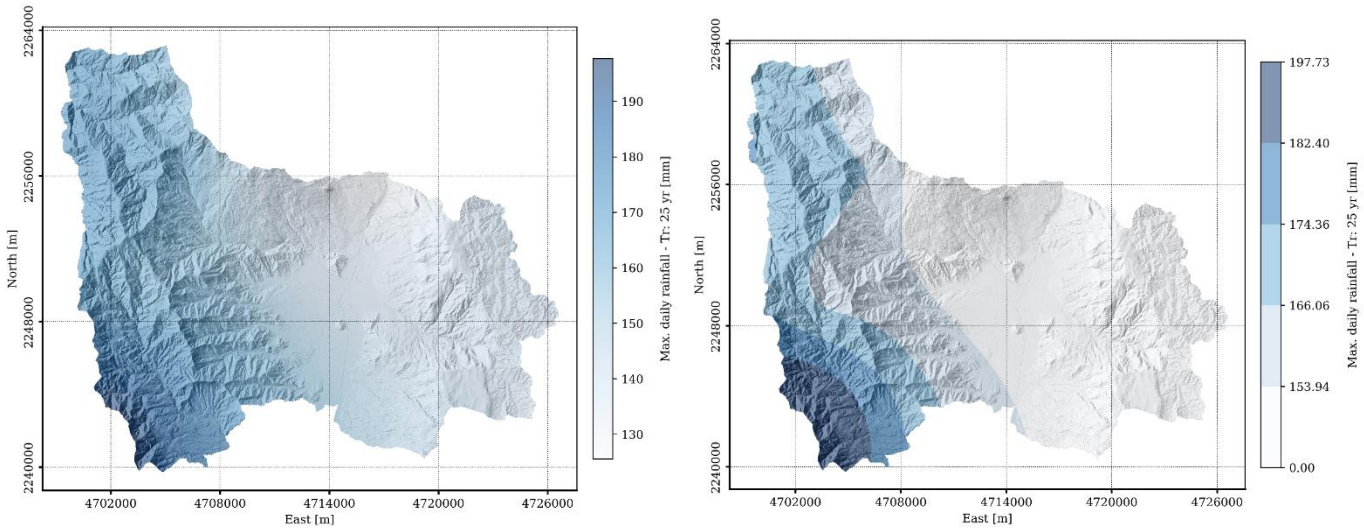
7.4.1 Detonante lluvia

Como parte de los insumos considerados para la zonificación de la amenaza por movimientos en masa, se incorporó el detonante lluvia mediante el análisis espacial de campos de precipitación máxima diaria asociados a diferentes periodos de retorno. El desarrollo metodológico completo, incluyendo el procesamiento estadístico de la información pluviométrica, la generación de los campos de lluvia y los análisis complementarios utilizados para su definición se presenta en el Anexo 15.

La Ilustración 113 muestra la distribución espacial de la lluvia máxima diaria para un período de retorno (Tr) de 25 años en el Distrito de Medellín. Los rangos de precipitación se establecieron a partir

de los percentiles 50, 70, 90 y 95. Estos rangos se utilizaron como insumo en la matriz de decisión para la zonificación de la amenaza, permitiendo incorporar el detonante dentro del modelo.

Para la definición del detonante lluvia se generaron campos de lluvia máxima diaria en 24 horas asociados a diferentes periodos de retorno, incluyendo Tr = 2,33, 5, 10, 25, 50 y 100 años, a partir del análisis estadístico de registros de estaciones IDEAM y SIATA localizadas dentro del Distrito de Medellín. Estos campos permitieron evaluar distintos escenarios de intensidad del detonante lluvia y su incidencia en los análisis de amenaza por movimientos en masa. En el presente estudio se adoptó el campo de lluvia máxima diaria correspondiente a Tr = 25 años como escenario de referencia, con el fin de mantener coherencia entre los análisis preliminares basados en datos y el modelo estocástico de base física finalmente seleccionado para la zonificación de amenaza.



a) Variable espacialmente continua *b) Discretización según percentiles 50, 70, 90 y 95*

Ilustración 113. Distribución espacial de la lluvia diaria máxima estimada para un Tr de 25 años en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

7.4.2 Detonante sismo

Coeficientes sísmicos de diseño

Para el análisis seudoestático se utilizarán las recomendaciones establecidas en la NSR-10 numeral H.5.2.5 Sismo de diseño, en donde se especifica que el coeficiente sísmico de diseño para análisis seudoestáticos de taludes (k_{ST}) deberá estimarse en función de la aceleración máxima del terreno (a_{max}) y ésta a su vez se toma del espectro de diseño para el periodo $T_s = 0\ s$, y se calcula en función de la aceleración pico efectiva (A_a), del factor de amplificación F_a y del coeficiente de importancia (I) como:

$$a_{\max} = A_a \times F_a \times I$$

Para el caso de Medellín, la norma NSR-10 establece un valor para A_a de 0.15 para un periodo de retorno (T_r) de 475 años. Por su parte, F_a tomaría un valor de 1.2 (considerando perfiles de suelo promedio tipo C del lado conservador para las zonas de ladera medias a altas). Finalmente, $I = 1.0$, considerando que las laderas no son edificaciones a las cuales se les deba asignar un coeficiente de importancia por grupo de uso. Si se reemplazan estos valores en la ecuación anterior se tiene que: $a_{\max} = 0.18$ g.

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

Tabla 25. Valores de k_{ST}/a_{max} mínimos para análisis seudoestático de taludes

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

Fuente: Adaptado de la NRS-10

Para el caso de suelos, enrocados y macizos rocosos muy fracturados sin análisis de amplificación se tiene una relación $k_{ST}/a_{\max} = 0.80$, por lo tanto, el coeficiente sísmico de diseño para análisis seudoestático de taludes es $k_{ST} = 0.8 \times a_{\max}$ =0.144.

Análisis de estabilidad estocástico

El análisis de estabilidad se realiza mediante el enfoque seudo-estático para un mecanismo de talud infinito representativo de cada unidad de ladera (Ilustración 114) siguiendo la siguiente definición del factor de seguridad:

$$FS = \frac{c' + \left((\cos\delta - k_{ST}\sin\delta)\gamma_s Z\cos\delta - \gamma_w\psi\right)\tan\phi'}{(\sin\delta + k_{ST}\cos\delta)\gamma_s Z\cos\delta}$$

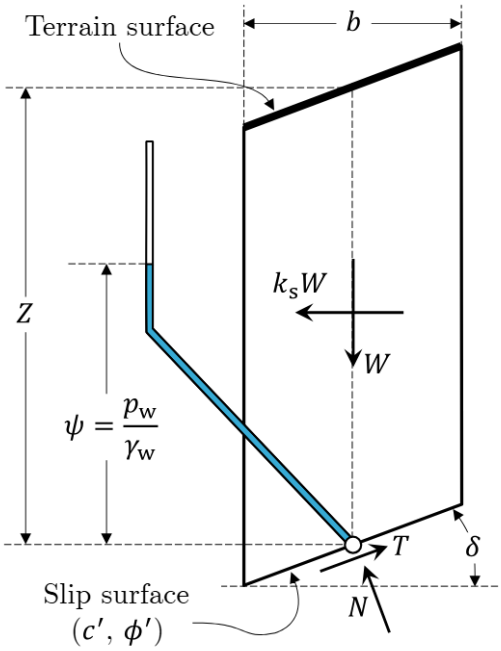


Ilustración 114. Mecanismo de talud infinito representativo de cada unidad de ladera para el análisis sísmico

Fuente: Universidad EAFIT, 2026

Al igual que para el detonante lluvia, se evalúan las condiciones sísmicas seudo-estáticas para las mismas muestras aleatorias y se calcula la probabilidad de falla (P_f) como la relación entre el número de fallas y el tamaño de la muestra.

Para comparar los resultados probabilistas asociados a detonantes con diferentes periodos de retorno, las probabilidades condicionales de falla deben expresarse en una escala temporal común. En este caso, la probabilidad de falla asociada al sismo se obtuvo condicionada a un evento sísmico con periodo de retorno $T_{r,sismo} = 475$años, mientras que la probabilidad asociada a lluvia corresponde a un evento con $T_{r,lluvia} = 25$años. Bajo el supuesto de ocurrencia de eventos detonantes como un proceso de Poisson, la tasa anual de falla puede escribirse como:

$$\lambda_f = \frac{P_{f,det}}{T_r}$$

Por tanto, para expresar la probabilidad condicional de falla sísmica en un periodo de retorno equivalente al de lluvia, se igualan las tasas anuales de falla:

$$\frac{P_{f,sismo}^{25,eq}}{25} = \frac{P_{f,sismo}^{475}}{475}$$

de donde se obtiene:

$$P_{f,sismo}^{25,eq} = P_{f,sismo}^{475} \frac{25}{475}$$

Esta transformación permite llevar la probabilidad de falla sísmica a una escala temporal equivalente de $T_r = 25$ años, facilitando su comparación directa con la probabilidad de falla por lluvia. Sin embargo, debe aclararse que $P_{f,sismo}^{25,eq}$ no representa la respuesta física del talud ante un sismo real de periodo de retorno de 25 años, sino una probabilidad condicional equivalente desde el punto de vista de la tasa anual de falla. La probabilidad anual correspondiente puede expresarse como:

$$P_{f,anual} = 1 - e^{-\lambda_f} = 1 - e^{-P_{f,det}/T_r}$$

lo cual conserva la consistencia temporal entre detonantes con diferentes frecuencias de ocurrencia.

La Ilustración 115 muestra la distribución espacial de la probabilidad de falla equivalente para un periodo de retorno de $T_r = 25$años, $P_{f,sismo}^{25,eq}$, evidenciando una ligera variabilidad espacial asociada a las condiciones topográficas, geomorfológicas y geológico-geotécnicas del área de estudio. No obstante, aunque se observan algunas diferencias entre sectores, estas variaciones se mantienen dentro de rangos bajos de probabilidad de falla, con predominio de valores menores al 3% (mediana de 2.16%) y sólo incrementos localizados hacia valores superiores cercanos al 5% en algunos sectores de ladera en las márgenes del valle.

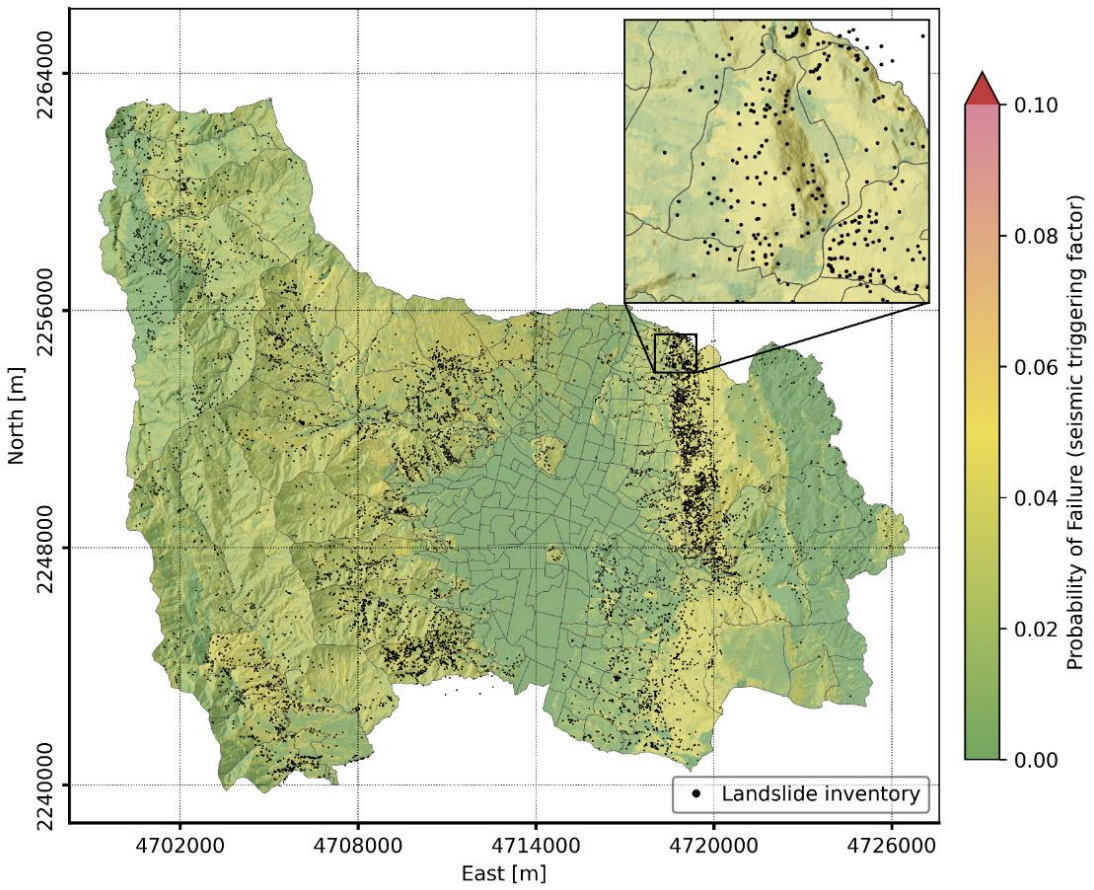


Ilustración 115. Probabilidad de falla sísmica a una escala temporal equivalente de $T_r = 25$ años

Fuente: Universidad EAFIT, 2026

Adicionalmente, se comparan ambos detonantes mediante el cálculo de las diferencias dadas por $\Delta P_{f,\text{ anual}} = P_{f,\text{ anual | lluvia}} - P_{f,\text{ anual | sismo}}$ y se obtuvo la siguiente distribución de valores:

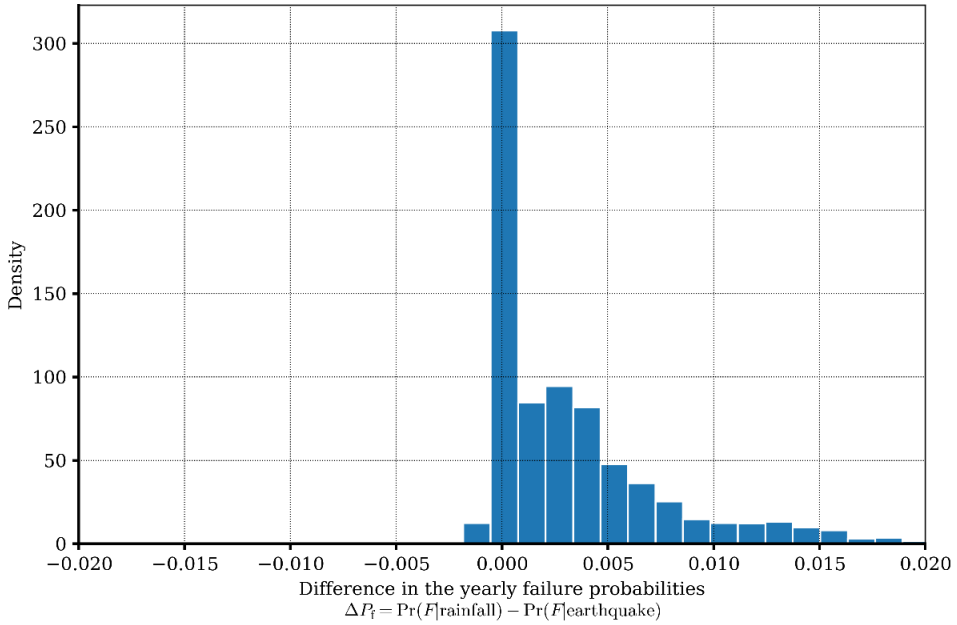


Ilustración 116. Diferencias en las probabilidades de falla anualizadas para los dos detonantes

Fuente: Universidad EAFIT, 2026

Se observa que la distribución de $\Delta P_{f,\text{ anual}}$es marcadamente asimétrica, con cola hacia la derecha. La mayor parte del histograma se ubica a la derecha de cero (valores positivos) y presenta un pico pronunciado en torno a $\Delta P_{f,\text{anual}} \approx 0$. Esto sugiere que, en la mayoría de los casos analizados, el detonante por lluvia aporta una probabilidad anual de falla igual o superior a la del detonante sísmico. Este comportamiento puede explicarse, por un lado, por la mayor frecuencia del evento de lluvia ($\lambda = 1/25$) frente al sismo ($\lambda = 1/475$); y, por otro, porque, aunque el sismo pueda inducir una probabilidad de falla condicional $P_{f,\text{det}}$elevada, su contribución se reduce al expresarla en términos anuales debido a su baja tasa de ocurrencia.

El máximo alrededor de cero indica que, para una fracción importante de los casos, ambas probabilidades anuales son similares o muy pequeñas, lo que concentra la diferencia cerca de $\Delta P_{f,\text{ anual}} = 0$. En coherencia con lo anterior, los pocos valores negativos pero muy cercanos a cero representan escenarios puntuales en los que el sismo podría resultar relativamente más influyente; sin embargo, dichas diferencias son marginales tras la anualización. En conjunto, los resultados respaldan que el detonante por lluvia constituye el factor dominante en la amenaza anual por deslizamientos en el distrito de Medellín.

7.4.3 Modelos estadísticos

La metodología de zonificación de la amenaza para modelos estadísticos se basa en un criterio matricial de decisión en el cual se superpone el modelo de susceptibilidad y el mapa de precipitaciones asociadas al periodo de retorno seleccionado (Ilustración 113). Este proceso se representa esquemáticamente en la Ilustración 117.

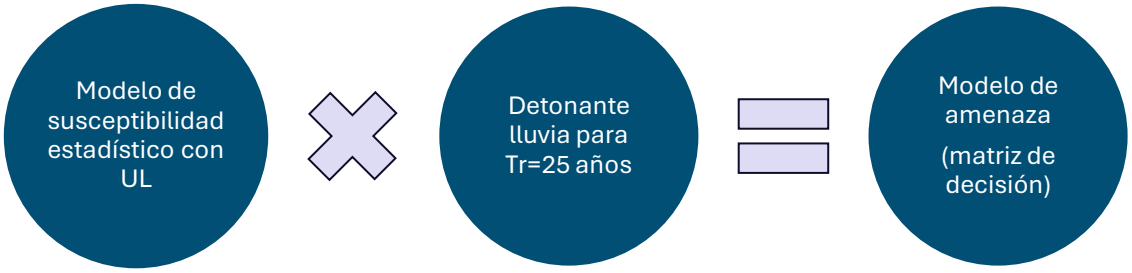


Ilustración 117. Esquema de estimación del modelo de amenaza por movimientos en masa para el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

La zonificación de la amenaza se definió en tres rangos: alta, media o moderada y baja, de acuerdo con los criterios establecidos en la matriz de decisión presentada en la Tabla 26. Los resultados correspondientes a los seis escenarios estadísticos evaluados se muestran en la Ilustración 118 a Ilustración 123. En estas se observa cómo varía la zonificación cuando se incorpora el detonante al modelo, es decir, al pasar de la susceptibilidad a la amenaza.

Tabla 26. Matriz de decisión para la zonificación de la amenaza por movimientos en masa para el Distrito de Medellín

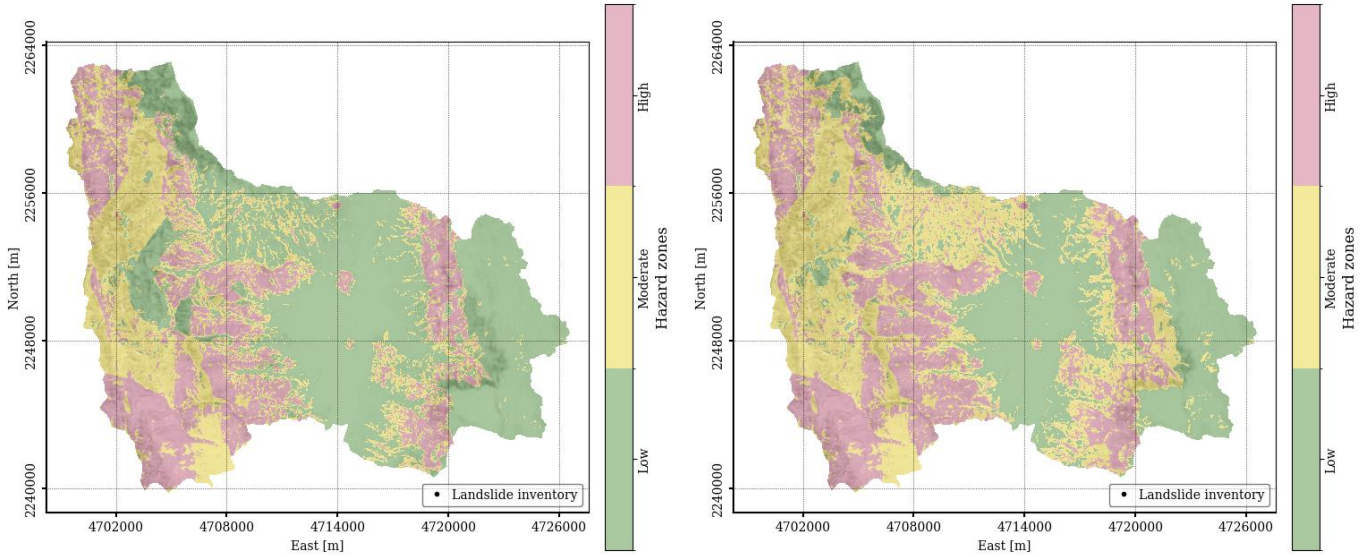
		Intensidad detonante				
		Muy baja	Baja	Moderada	Alta	Muy alta
Susceptibilidad	Baja					
	Media					
	Alta					

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

En los modelos basados en datos, la intensidad del detonante lluvia fue incorporada mediante la discretización del campo de lluvia máxima diaria en clases relativas definidas a partir de percentiles. Para el escenario de referencia Tr = 25 años, los rangos de precipitación se establecieron con base en los percentiles 50, 70, 90 y 95, permitiendo clasificar la intensidad del detonante dentro del Distrito. Estas clases fueron integradas con la zonificación de susceptibilidad mediante la matriz de decisión de la Tabla 26, de manera que las combinaciones de mayor susceptibilidad y mayor intensidad relativa del detonante condujeran a mayores categorías de amenaza.

Es importante precisar que, para los modelos estadísticos, la zonificación no resulta altamente sensible al periodo de retorno seleccionado. Esto se debe a que los campos de lluvia asociados a diferentes Tr conservan patrones espaciales similares y, al ser reclasificados mediante percentiles, tienden a producir zonas discretas de intensidad relativa semejantes. Adicionalmente, la matriz de decisión no asigna pesos diferenciales a la magnitud absoluta de la lluvia ni al periodo de retorno, sino que cruza categorías ordinales de susceptibilidad e intensidad del detonante. En este sentido, el Tr = 25 años fue utilizado como escenario de referencia para los modelos estadísticos, manteniendo consistencia con el escenario empleado en el modelo estocástico de base física.

En particular, los cambios más notorios se evidencian en el costado suroccidental del Distrito, específicamente en los corregimientos de San Antonio de Prado y Altavista, en límites con el municipio de Ebéjico, donde la densidad de áreas con susceptibilidad moderada disminuye, y aumenta la categoría alta, debido a que esta zona coincide con sectores de mayor intensidad de precipitación. De manera similar, en el mismo costado, pero hacia la zona central, se observa una reducción de las áreas inicialmente clasificadas con baja susceptibilidad, las cuales pasan a categoría moderada. Un comportamiento análogo, aunque de menor intensidad, se presenta en el costado oriental del Distrito.

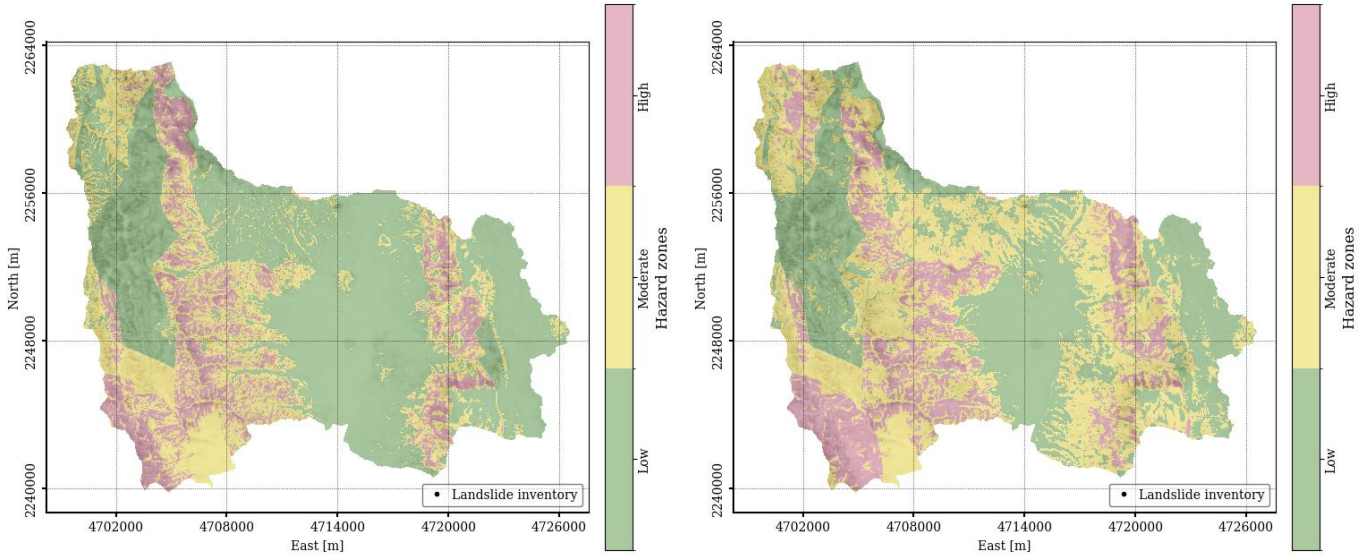


a) Inventario DAGRD–SIATA

b) Inventario DAP

Ilustración 118. Zonificación de la amenaza en el distrito de Medellín por el método peso de la evidencia para un Tr de 25 años

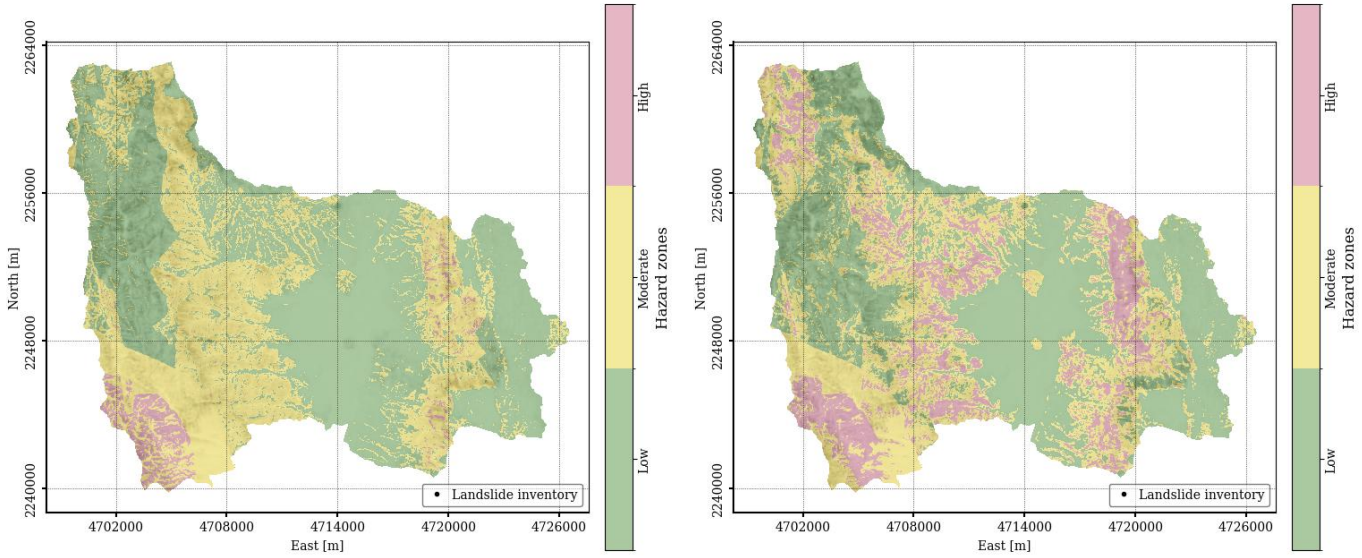
Fuente: Universidad EAFIT, 2025



a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

Ilustración 119. Zonificación de la amenaza en el distrito de Medellín por el método regresión logística para un Tr de 25 años

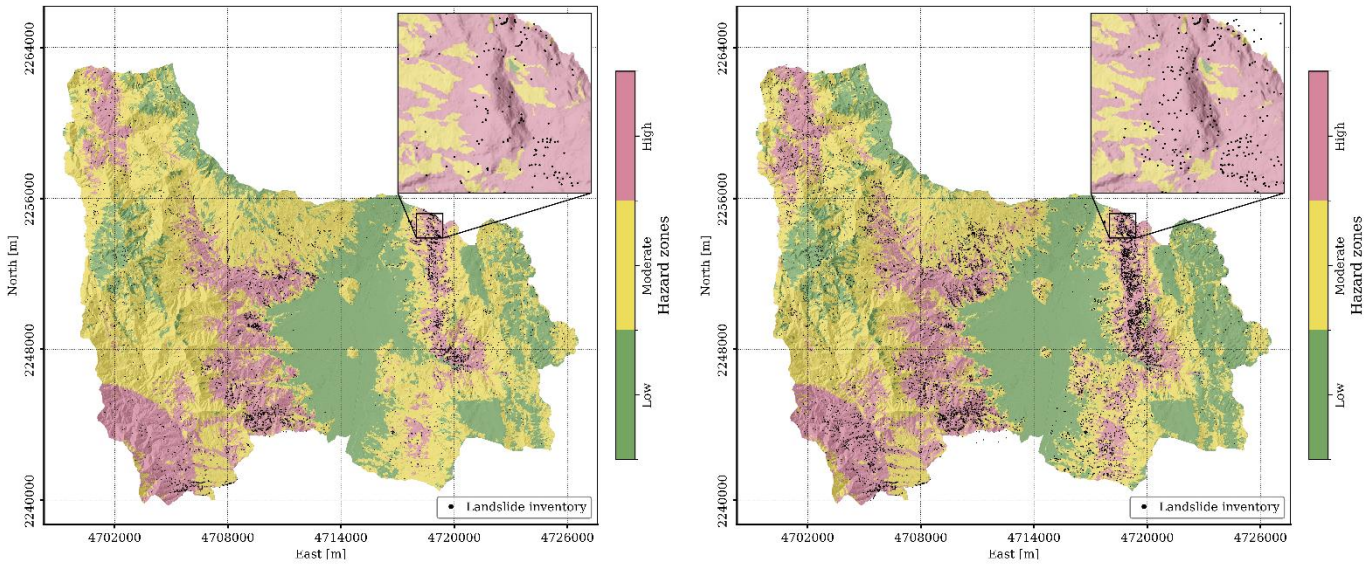
Fuente: Universidad EAFIT, 2025



a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

Ilustración 120. Zonificación de la amenaza en el distrito de Medellín por el método estadístico random forest para un Tr de 25 años

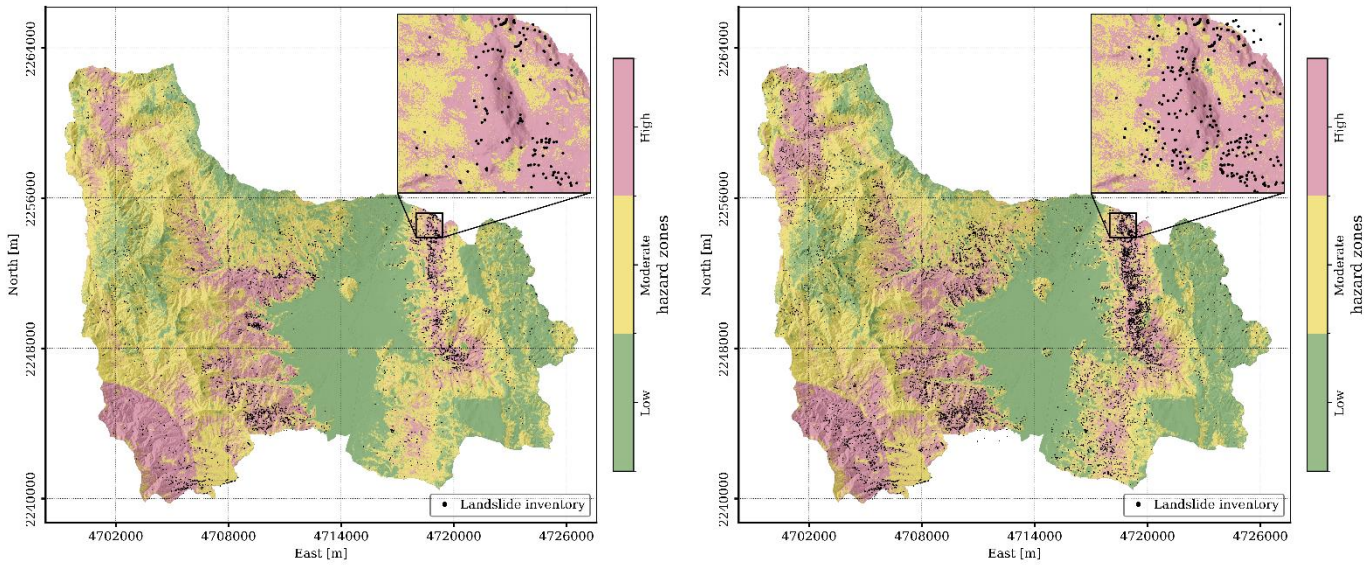
Fuente: Universidad EAFIT, 2025



a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

Ilustración 121. Zonificación de la amenaza en el Distrito de Medellín por el método estadístico valor de la información (UL) para un Tr de 25 años

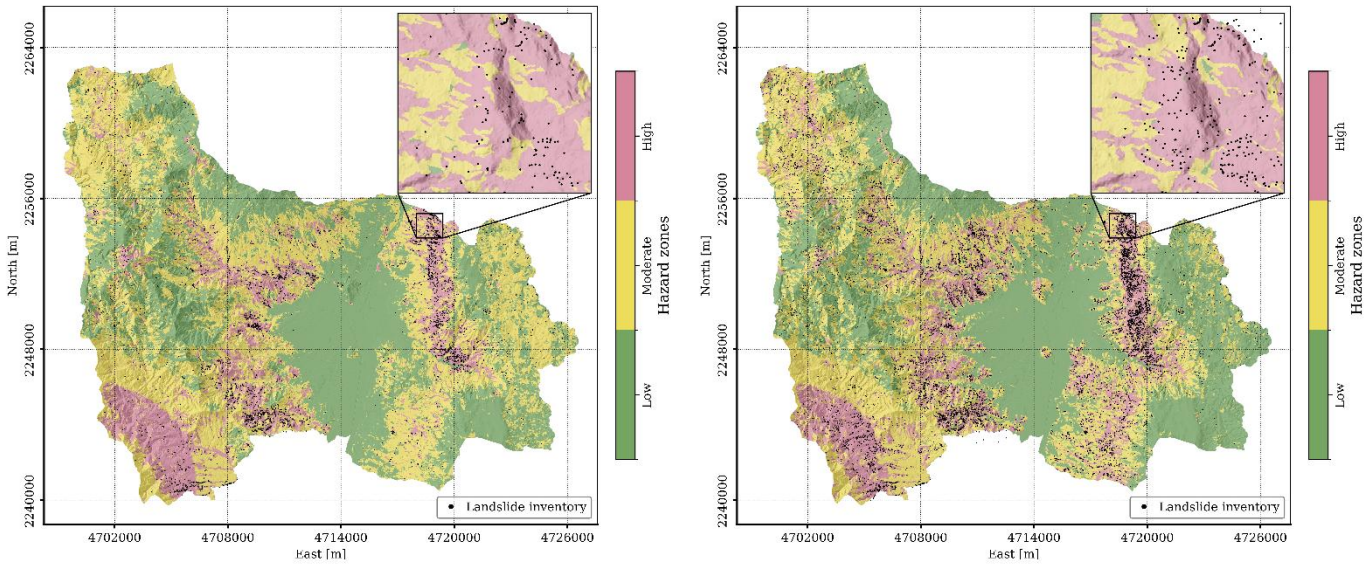
Fuente: Universidad EAFIT, 2025



a) Inventario DAGRD–SIATA *b) Inventario DAP*

Ilustración 122. Zonificación de la amenaza en el Distrito de Medellín por el método estadístico valor de la información (píxeles) para un Tr de 25 años

Fuente: Universidad EAFIT, 2025



a) Inventario DAGRD–SIATA

b) Inventario DAP

Ilustración 123. Zonificación de la amenaza en el Distrito de Medellín por el modelo de red neuronal (UL) para un Tr de 25 años

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

7.4.4 Modelo de base física

En el presente estudio se consideraron múltiples enfoques para la evaluación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa. Aunque los métodos estadísticos resultan útiles para una aproximación inicial a la evaluación, sus limitaciones se hacen evidentes al compararlos con la capacidad de los modelos de base física para representar directamente los procesos mecánicos que gobiernan la inestabilidad del terreno.

En el caso del Distrito de Medellín, caracterizado por una complejidad geológica y geomorfológica considerable, además de una fuerte interacción entre procesos hidrológicos y geotécnicos, se requiere una aproximación más detallada que incorpore adecuadamente dicha complejidad. La modelación física permite simular la respuesta transitoria del terreno frente al detonante lluvia e integrar la incertidumbre a través de distribuciones probabilísticas, resultando en una zonificación basada en probabilidades de falla.

Esta capacidad aporta una base más sólida y realista para jerarquizar zonas críticas y orientar la gestión del riesgo. Por estas razones, se adoptó el modelo de base física con enfoque estocástico como la metodología de referencia para la zonificación definitiva de la amenaza por movimientos en masa en el Distrito de Medellín.

7.4.4.1 Generación de muestras aleatorias

Con el fin de incorporar la incertidumbre y variabilidad presentes en el Distrito de Medellín, se implementó un enfoque de modelación física estocástica, el cual permite considerar la incertidumbre y variabilidad de los parámetros en los resultados sin recurrir a escenarios deterministas.

Para lo anterior se generaron muestras aleatorias de tamaño $n = 100$ de los parámetros hidromecánicos. El ángulo de fricción y el peso unitario siguen una distribución normal, mientras que la cohesión sigue una lognormal (ver Ilustración 124) basándose en los datos compilados en la Tabla 24 para cada zona geológico-geotécnica. Por su parte, los parámetros hidráulicos siguen distribuciones uniformes dentro de rangos típicos sin diferenciar entre zonas (Ilustración 125).

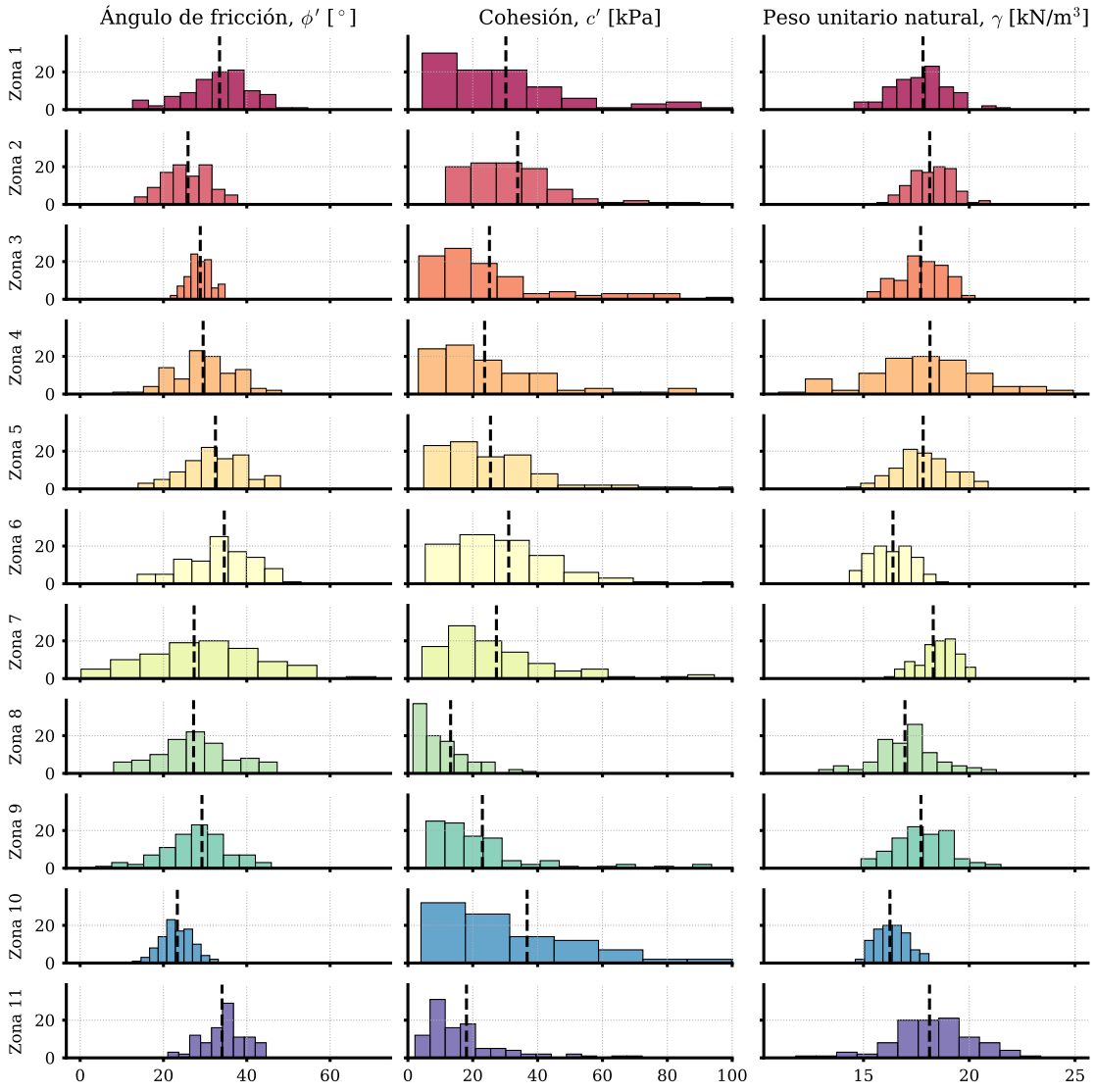


Ilustración 124. Histograma de las muestras aleatorias de los parámetros geomecánicos para cada zona geológica

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

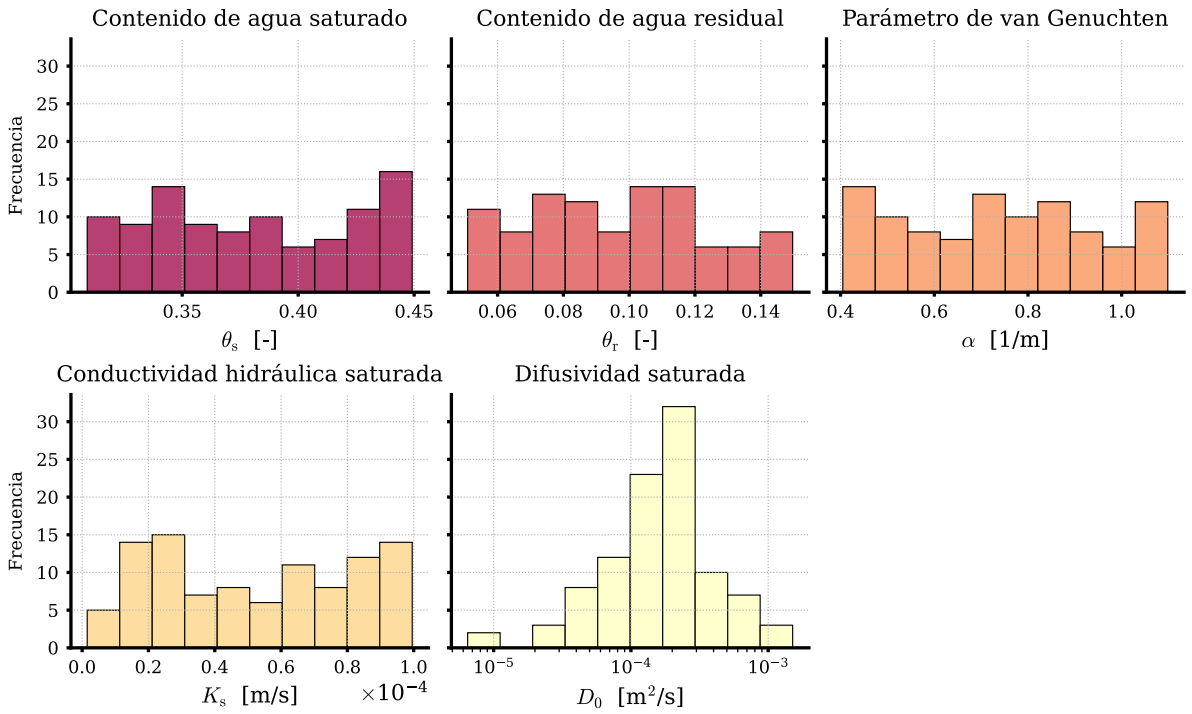


Ilustración 125. Histograma de las muestras aleatorias de los parámetros hidráulicos para el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

7.4.4.2 Análisis y zonificación de la susceptibilidad bajo un enfoque estocástico

Aunque ya se tenía un primer cálculo de la susceptibilidad mediante el método de base física, este tenía un enfoque determinista que no consideraba la incertidumbre en los parámetros geotécnicos. Por lo cual, para soportar el análisis de amenaza estocástico, se realiza primero una reevaluación de la susceptibilidad bajo el mismo enfoque como se describe a continuación.

Al evaluar los factores de seguridad a partir de las distribuciones de la sección anterior se puede calcular la probabilidad de falla sin considerar el efecto del detonante, es decir que sería equivalente al índice de susceptibilidad de los métodos estadísticos. Su distribución espacial se presenta en la Ilustración 126.

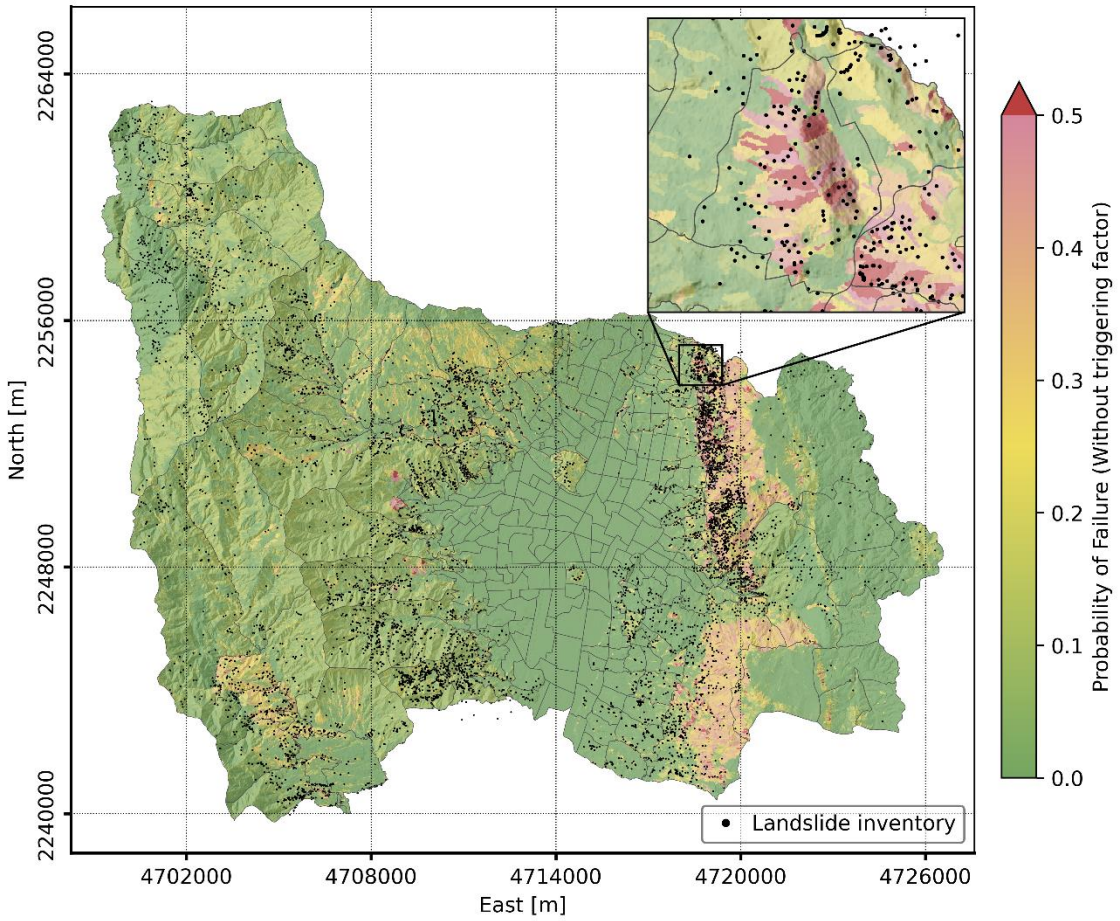


Ilustración 126. Distribución espacial de la probabilidad de falla en ausencia del detonante lluvia en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Aunque la aproximación adoptada no depende rigurosamente del inventario de deslizamientos, estos se usaron para proponer los límites de la zonificación mediante la curva de éxito, la cual se muestra en la Ilustración 127. En este caso se adoptó como umbral para la zona de susceptibilidad alta a media el índice que hiciera que se abarcara un 50% de deslizamientos en la zona de amenaza alta; para el umbral de susceptibilidad media a baja se tomó el índice que hiciera que se abarcara un 80% de los deslizamientos en las zonas de amenaza alta y media conjuntamente. Estos umbrales corresponden respectivamente a $2.4*10^{-3}$ y $4.4*10^{-3}$ de probabilidad anual de falla (ver Tabla 90).

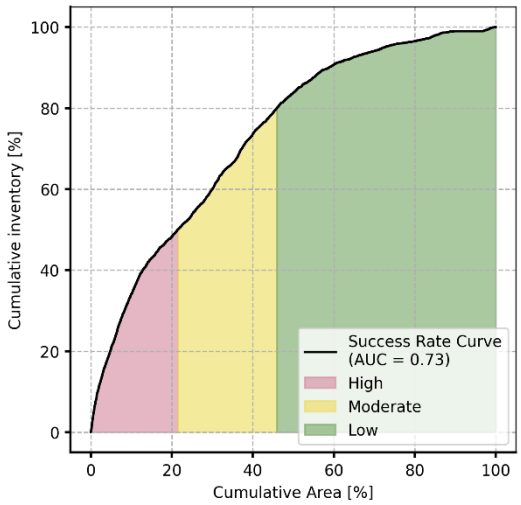


Ilustración 127. Curva de éxito, área bajo la curva y delimitación de umbrales para la zonificación

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

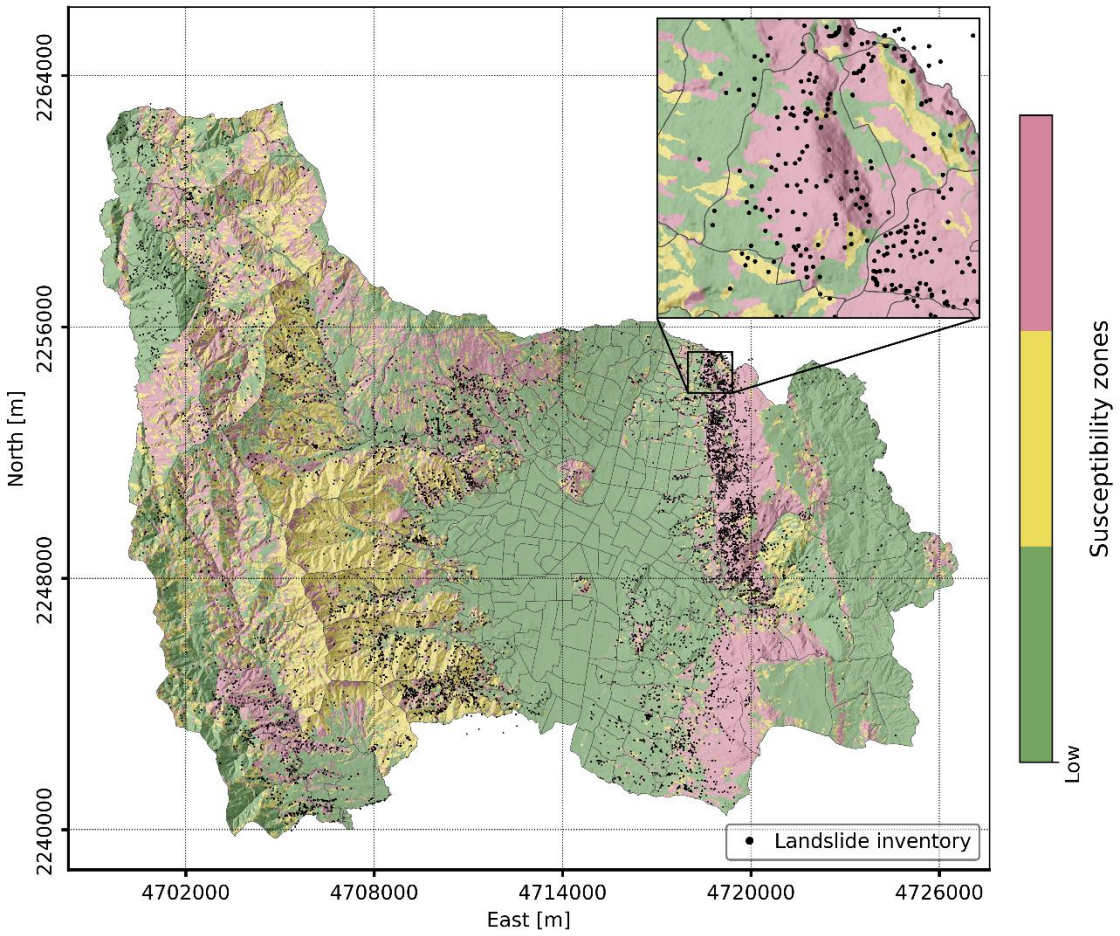


Ilustración 128. Zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

De manera general, la anterior zonificación guarda coherencia con la distribución espacial de deslizamientos del inventario, el cual se muestra en un mapa de densidades en la Ilustración 85b. No obstante, existen algunas zonas de susceptibilidad alta donde la densidad de movimientos en masa no es tan alta, indicando que son zonas en las que existe una incertidumbre considerable que deben tener especial seguimiento para la ocurrencia de eventos futuros.

7.4.4.3 Análisis y zonificación de la amenaza bajo un enfoque estocástico

Aunque previamente se evaluaron escenarios de amenaza mediante modelos basados en datos y una matriz de decisión entre susceptibilidad e intensidad relativa del detonante, la zonificación final adoptada para el análisis de amenaza por movimientos en masa corresponde al modelo estocástico de base física. En este enfoque, la amenaza se estimó a partir de la probabilidad de falla bajo el escenario de lluvia seleccionado, incorporando la incertidumbre de los parámetros geomecánicos e hidráulicos mediante distribuciones probabilísticas.

Para este modelo se empleó el campo de lluvia máxima diaria correspondiente a Tr = 25 años. La adopción de este escenario se sustentó en la comparación de los resultados obtenidos, el desempeño del modelo frente al inventario de movimientos en masa y la coherencia espacial de la zonificación resultante. A diferencia de los modelos estadísticos, en los cuales el detonante se incorpora como una clase relativa dentro de una matriz de decisión, en el modelo estocástico de base física la lluvia incide directamente en el cálculo de la probabilidad de falla espacial.

En el modelo estocástico de base física, la definición de los umbrales de zonificación se apoyó en la curva de éxito, utilizando el inventario de movimientos en masa como referencia para evaluar la capacidad discriminante del modelo. Bajo este criterio, el escenario Tr = 25 años permitió obtener un balance adecuado entre la magnitud del campo de lluvia modelado, la proporción de procesos inventariados capturados por las categorías de amenaza y la distribución espacial final de la zonificación. De esta manera, se evitó tanto la subrepresentación de zonas potencialmente críticas como la sobrerrepresentación de áreas en amenaza alta.

Como se describió anteriormente para el análisis de la amenaza a partir de los modelos estadísticos, la Ilustración 113 muestra la distribución espacial de la lluvia máxima diaria para un período de retorno de 25 años en el Distrito de Medellín, que corresponde al detonante seleccionado para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa. Se observa una marcada concentración de las mayores lluvias diarias máximas hacia el occidente, siendo aún más marcado hacia el suroccidente. Por otro lado, los menores valores de lluvias diarias máximas se distribuyen hacia el este y noreste, siendo aún cantidades significativas de precipitación.

La Ilustración 125 presenta las muestras aleatorias generadas para los parámetros hidráulicos, insumos clave en la modelación física del proceso de infiltración para la evaluación de la amenaza. Similar al cálculo de susceptibilidad, se determinó la probabilidad de falla incluyendo el efecto del

detonante; su distribución está dada en el mapa de la Ilustración 129, en la cual se observa un incremento de las probabilidades de falla notablemente en las laderas del flanco occidental del valle, así como en algunas laderas de la cuenca de las quebradas doña María y La Iguaná. Por el contrario, en la zona oriental el cambio en las probabilidades no es tan significativo por el efecto combinado de dos factores: una menor intensidad del detonante y una condición desfavorable muy marcada desde la evaluación de la susceptibilidad.

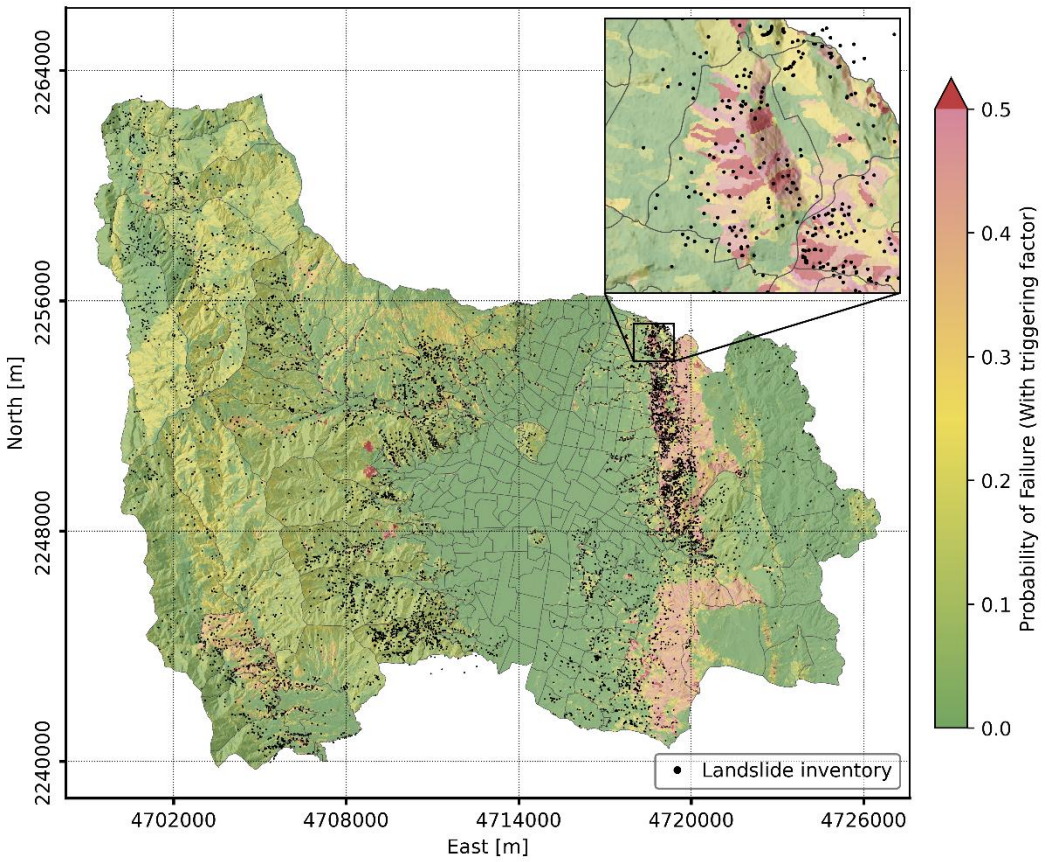


Ilustración 129. Distribución espacial de la probabilidad de falla para el detonante lluvia con Tr de 25 años en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Manteniendo los mismos índices de zonificación adoptados para la susceptibilidad se obtuvo la zonificación de la amenaza que se presenta en la Ilustración 130. Esta zonificación reafirma el efecto del detonante mostrando los cambios del nivel de zonificación de susceptibilidad a amenaza principalmente en toda la zona occidental del distrito y en los alrededores de las zonas de susceptibilidad alta de las laderas orientales, las cuales pasaron de susceptibilidad baja a media.

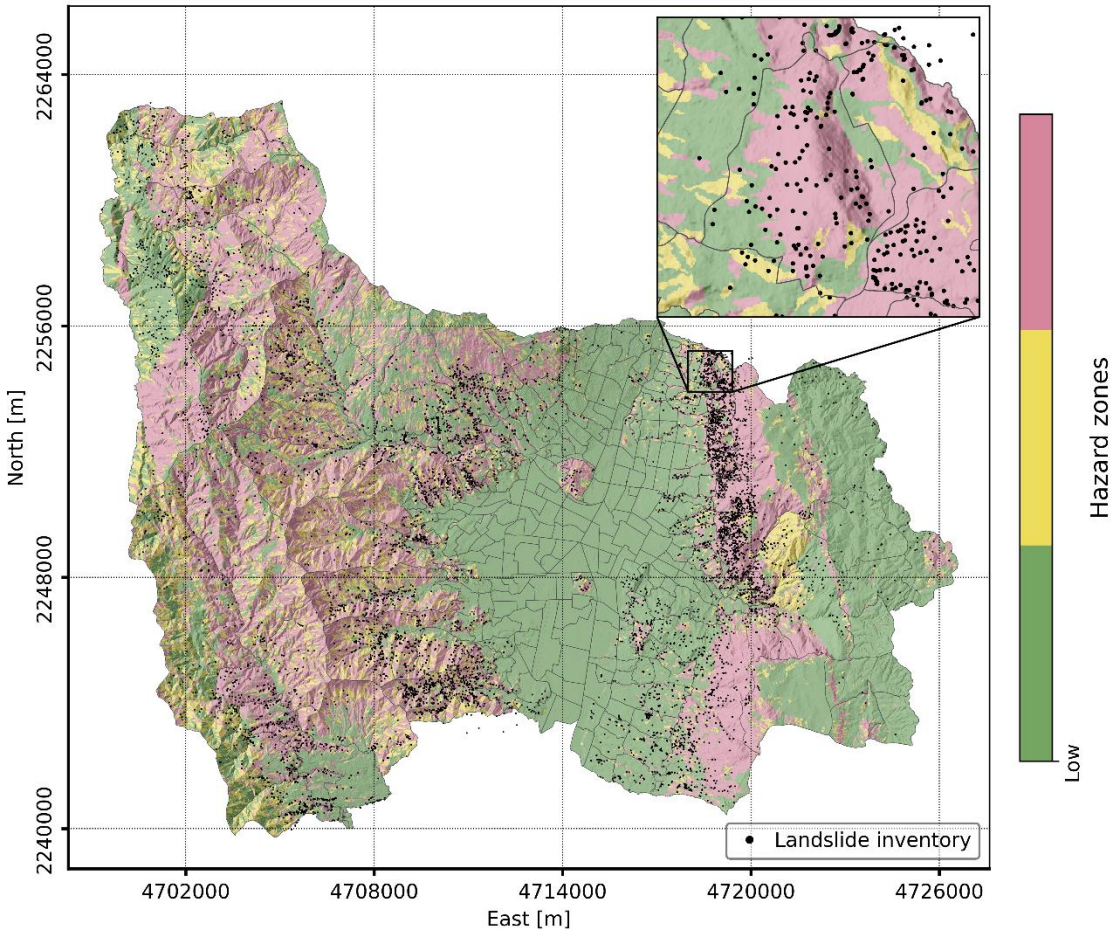


Ilustración 130. Zonificación de la amenaza por movimientos en masa en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

A continuación, se presenta una definición general para cada una de las zonas de amenaza, para esto se adoptó como umbral para la zona de susceptibilidad alta a media el índice que hiciera que se abarcara un 50% de deslizamientos en la zona de amenaza alta; para el umbral de susceptibilidad media a baja se tomó el índice que hiciera que se abarcara un 80% de los deslizamientos en las zonas de amenaza alta y media conjuntamente. Estos umbrales corresponden respectivamente a $2.4*10^{-3}$ y $4.4*10^{-3}$ de probabilidad anual de falla (ver Tabla 90):

- **Amenaza alta**
  Comprende laderas fuertes a muy fuertes (pendiente mediana ≈ 30°), concentradas en los escarpes de la ladera oriental y en franjas extensas del flanco occidental del valle, además de tramos marcados en las laderas de las quebradas La Iguaná y Doña María. Geológicamente dominan los depósitos de vertiente tipo flujo de lodos y/o escombros, el Stock de Altavista, rocas esquistosas de los complejos Baldías y Cajamarca y la Dunita de Medellín. La probabilidad de falla es elevada (~41 % de las SU con PF ≥ 0.20). Y concentra la mayor parte del inventario con un ~57 % de los deslizamientos registrados.

- **Amenaza media**
  Relieves moderados a fuertes (pendiente mediana ≈ 26°). La probabilidad de falla disminuye considerablemente, concentrándose en valores de 0.07 a 0.09 (mediana 0.08). Geológicamente predominan el Stock de Altavista, rocas esquistosas, depósitos de vertiente tipo flujo de lodos y/o escombros, y rocas volcánicas y volcano-sedimentarias, litologías que mantienen susceptibilidad intermedia y concentraciones locales del inventario, abarcando un ~25 % del total de deslizamientos registrados.

- **Amenaza baja**
  Abarca relieves suaves a moderados (pendiente mediana ≈ 14), incluyendo planicies aluviales y superficies en depósitos aluvio-torrenciales, laderas bajas de los flancos del valle y superficies suaves en suelo residual en el altiplano. Geológicamente son comunes los depósitos de vertiente tipo flujo de lodos y/o escombros, las Anfibolitas de Medellín, unidades gabróicas (complejo Romeral y gabro de San Diego) y metabasitas, así como rocas metamórficas néisicas y milonitas. La probabilidad de falla es generalmente baja (mediana ≈ 0.01, usualmente ≤ 0.05) y abarca un ~19 % del inventario de deslizamientos.

7.5 ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN DE MOVIMIENTOS EN MASA

Como se indicó en la metodología, para la modelación de propagación de deslizamientos (*runout*) llevó a cabo una evaluación probabilista de la propagación se generaron 300 realizaciones a partir de muestras aleatorias de los parámetros de control del modelo. La Ilustración 131 muestra los histogramas correspondientes a estas muestras aleatorias.

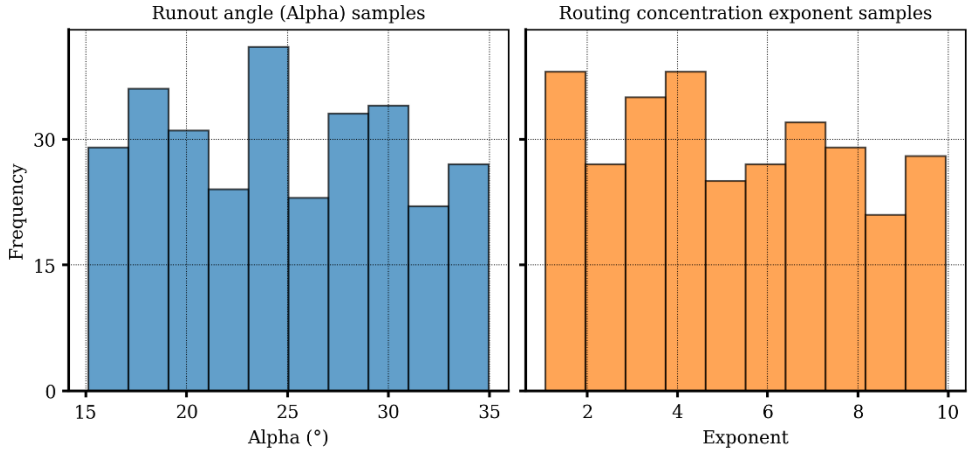


Ilustración 131. Histogramas de las muestras aleatorias para la modelación probabilista de propagación de deslizamientos

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

El modelo se ejecutó para cada una de las 300 combinaciones de parámetros y fuentes, produciendo mapas de extensión de propagación simulados. Posteriormente, los resultados parciales de cada simulación fueron combinados para calcular el índice de Probabilidad de Exposición a Propagación (PEP), definido como la razón entre el número de veces que una celda fue afectada y el total de realizaciones. Dicho índice refleja la probabilidad relativa de que un área determinada de la cuenca sea alcanzada por la propagación de masa.

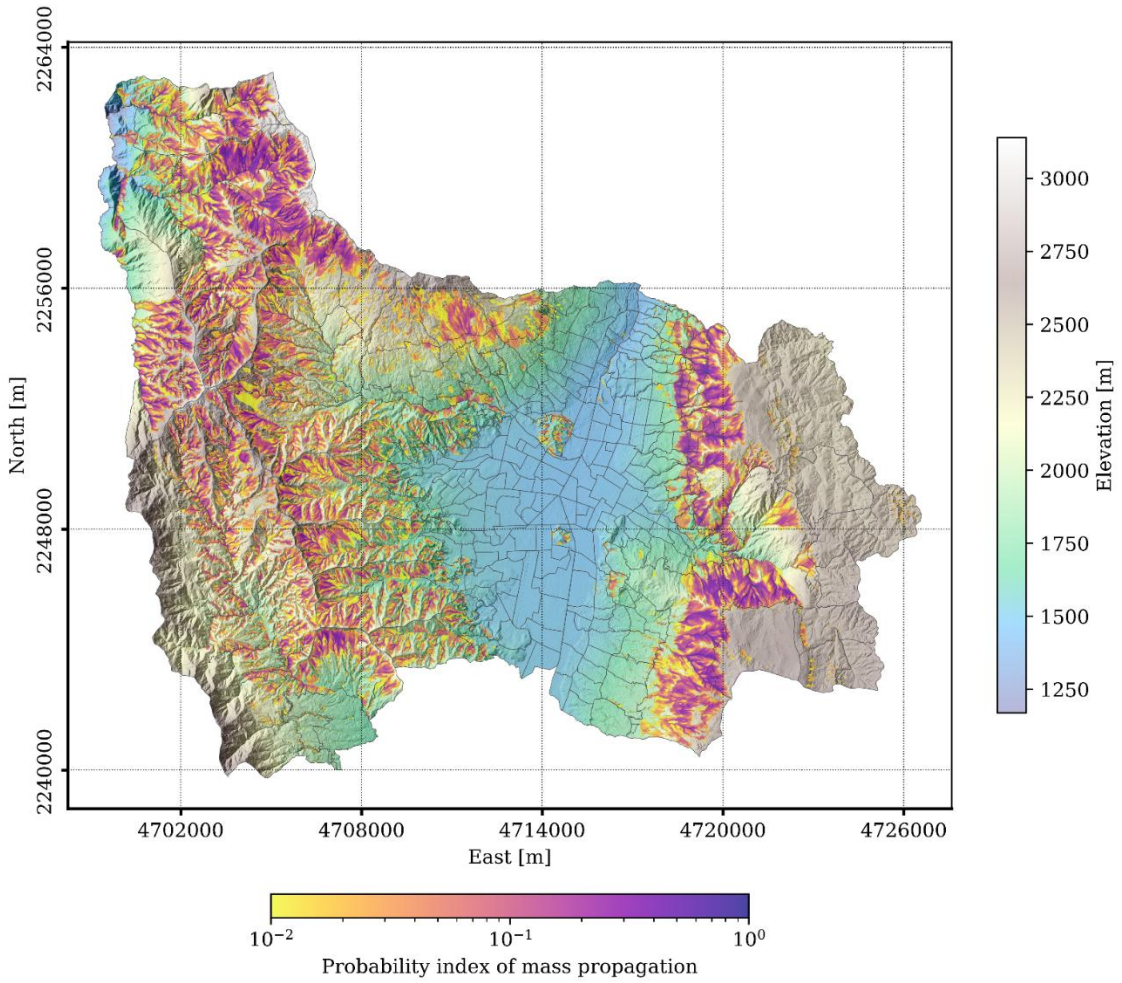


Ilustración 132. índice de Probabilidad de Exposición a Propagación

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Se evalúan 4 índices de probabilidad de trayectoria de la propagación, el primero (Ilustración 133) presenta todo lo que es mayor al 0%, que corresponde al escenario más crítico, en la Ilustración 134 se presenta el índice mayor al 10%, En la Ilustración 135 se presentan los resultados de la propagación para el índice mayor al 25% y en la Ilustración 136 se presenta la propagación para un índice mayor al 50%. Las imágenes de la izquierda representan las diferencias de las zonas de

propagación respecto a las de amenaza alta por rotura únicamente, es decir, lo que potencialmente sería una extensión a las zonas de amenaza alta ya definidas por el modelo en base física estocástico; y las imágenes de la derecha representan la zonificación incluyendo el modelo de propagación para cada uno de los índices. En la

Tabla *27* se presenta la distribución de las áreas para cada índice de propagación.

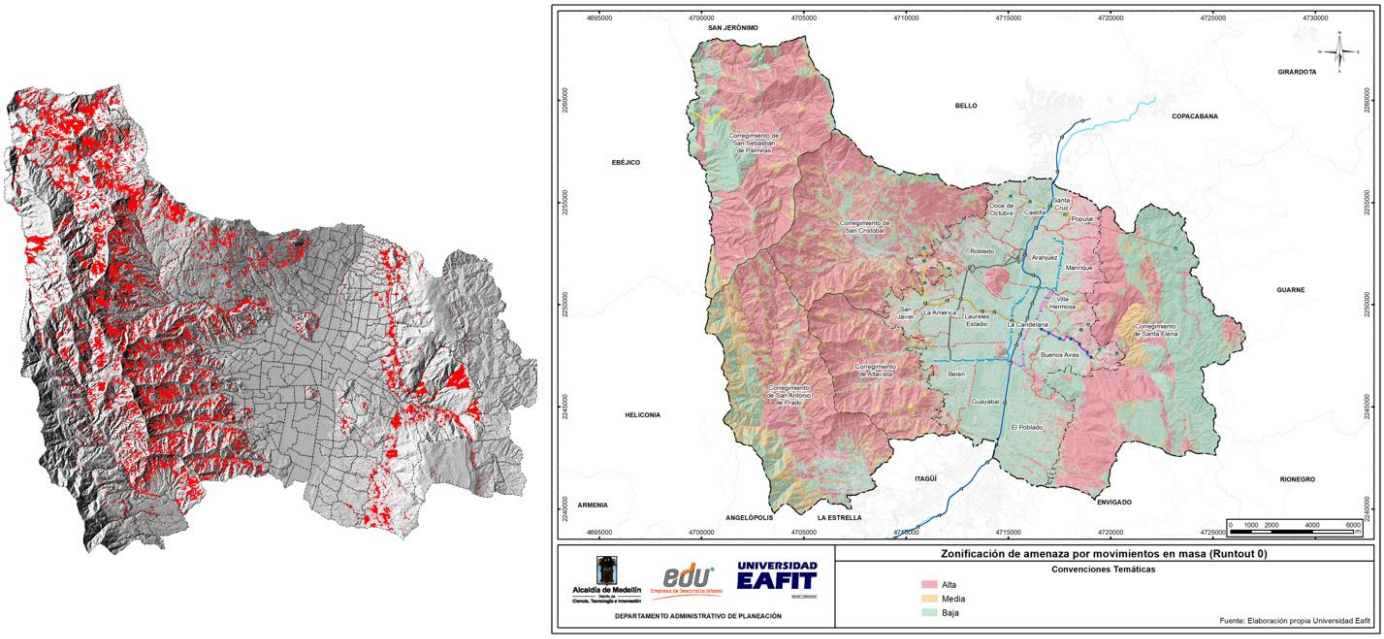


Ilustración 133. Áreas afectadas y zonificación de amenaza por índice de Probabilidad de Exposición a Propagación mayor a 0%.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

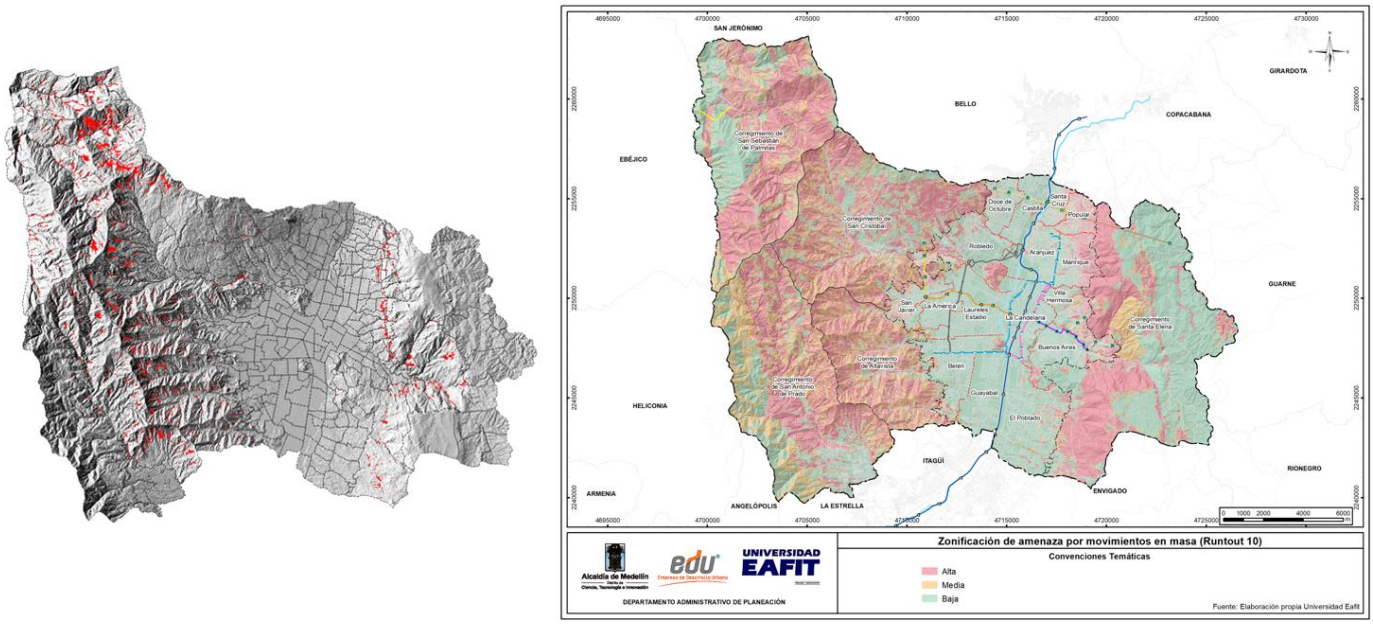


Ilustración 134. Áreas afectadas y zonificación de amenaza por índice de Probabilidad de Exposición a Propagación mayor a 10%.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

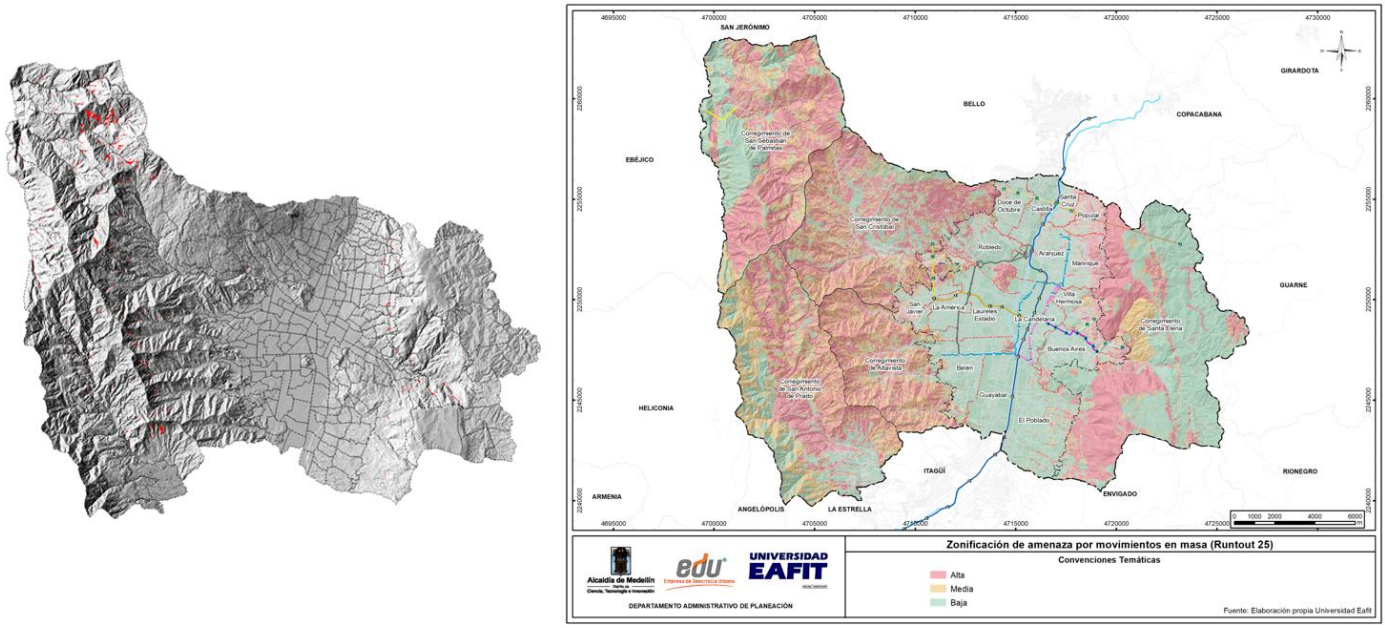


Ilustración 135. Áreas afectadas y zonificación de amenaza por índice de Probabilidad de Exposición a Propagación mayor a 25%.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

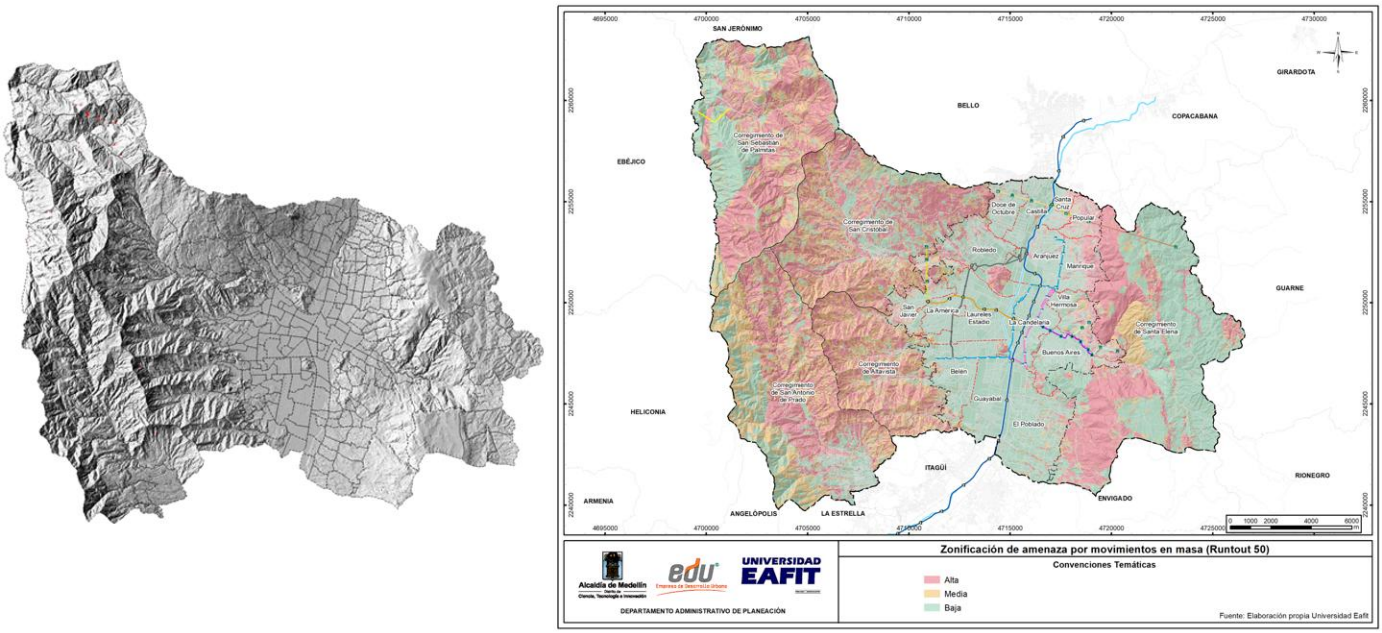


Ilustración 136. Áreas afectadas y zonificación de amenaza por índice de Probabilidad de Exposición a Propagación mayor a 50%.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Tabla 27. Distribución de áreas en los diferentes índices de propagación

Amenaza	Alta	Media	Baja
Amenazas Runout 0	44,66%	14,37%	40,97%
Amenazas Runout 10	35,99%	20,29%	43,72%
Amenazas Runout 25	34,41%	21,48%	44,11%
Amenazas Runout 50	34,04%	21,77%	44,19%

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Se evaluaron cuatro escenarios de propagación: PEP > 0 %, PEP > 10 %, PEP > 25 % y PEP > 50 %. El escenario PEP > 0 % representa la condición más amplia, pues incluye cualquier celda afectada al menos una vez en las simulaciones. En contraste, los escenarios PEP > 25 % y PEP > 50 % son más restrictivos y representan únicamente las trayectorias con mayor persistencia dentro del conjunto de realizaciones. El escenario PEP > 10 % fue seleccionado como escenario de referencia para la zonificación con propagación, por representar un resultado balanceado entre estos extremos. La selección del escenario PEP > 10 % se justifica porque permite complementar el mapa de amenaza obtenido previamente a partir del modelo estocástico de base física, incorporando zonas de alcance potencial de los movimientos en masa con recurrencia suficiente dentro del conjunto de simulaciones. El resultado final de la zonificación se presenta en la Ilustración 137.

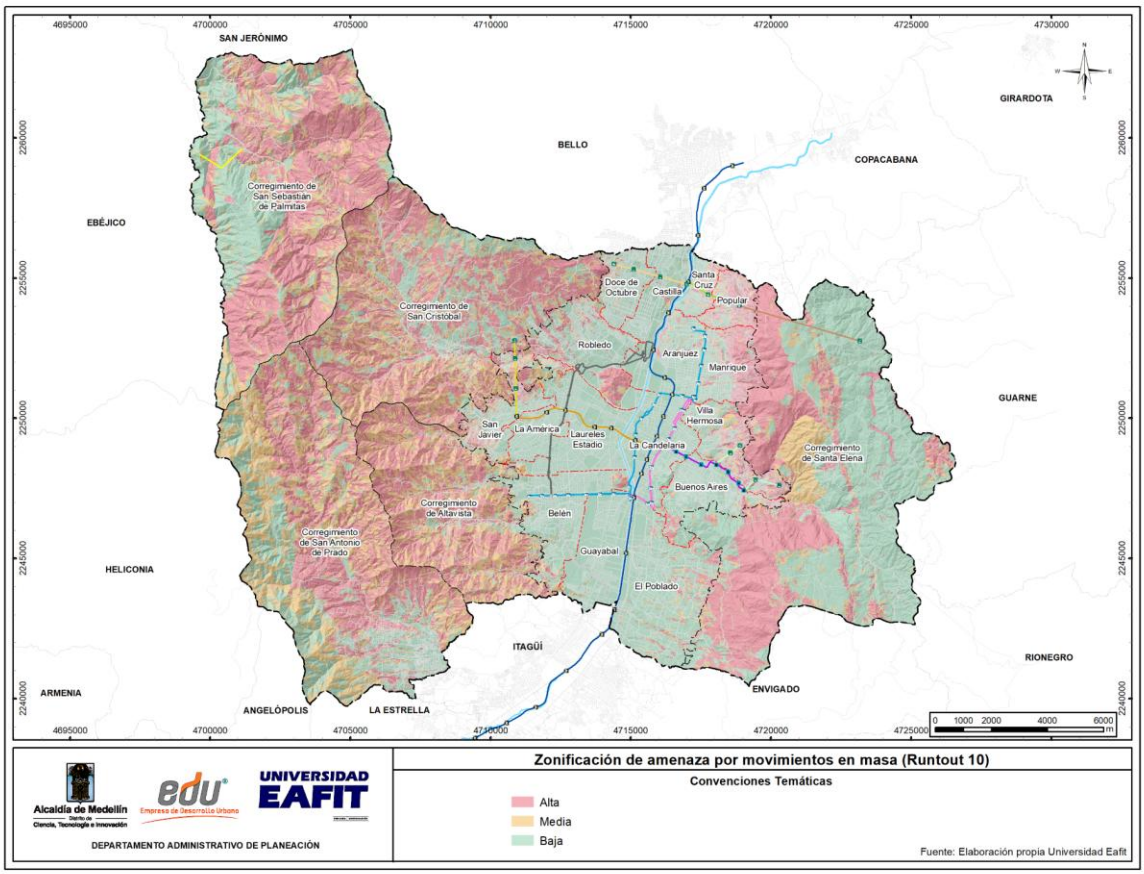


Ilustración 137. Zonificación de la amenaza por movimientos en masa con propagación en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

8 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

Con el fin de clasificar adecuadamente las cuencas de interés en el Distrito de Medellín y su respectiva priorización, se realizó la comparación entre los registros de eventos, las zonas definidas en amenaza alta y media y los resultados de los índices morfométricos. A partir de esta priorización se definieron las vertientes objeto de estudio y sobre las cuales se adelantaron los estudios hidrológicos, hidráulicos, generación de manchas de inundación y, en definitiva, la zonificación de la amenaza por inundación y avenidas torrenciales.

Para la implementación de índices morfométricos como parte de la clasificación de las cuencas ubicadas en el área de interés, se partió de las condiciones topográficas y morfométricas de diferentes vertientes, y así, implementar metodologías recomendadas dentro del documento: Guía metodológica para zonificación de amenazas por avenidas torrenciales, SGC, 2021, permitiendo definir el grado o la posibilidad de que una vertiente evaluada presente algún tipo de respuesta torrencial.

Por otra parte, se hizo la revisión de información disponible en cuanto a registros de eventos de inundación y avenidas torrenciales, y las manchas de amenaza asociada a cada tipo de fenómeno. Esta información fue tomada de la base de datos de la Unidad Nacional para la Gestión de Riesgos de Desastres – UNGRD y el Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres – DAGRD del Distrito de Medellín. Dentro de este análisis, también se incluyó la información relacionada con las zonas de amenaza media y alta por avenida torrencial e inundación, establecidas dentro del Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Medellín – Acuerdo 048 de 2014 y la información proporcionada por el POMCA del Río Aburrá en cuanto a avenida torrencial. Esta información pudo clasificarse de acuerdo con las corrientes naturales presentes en cada estudio.

El DAGRD proporcionó información histórica georreferenciada en tres capas en formato SHP con eventos de inundación y avenidas torrenciales. Se utilizaron las bases de datos de SIRE (2021 en adelante) y ACCESS (2004-2021) en las que se identificaron un total de 2465 registros, de los cuales 43 correspondían a avenidas torrenciales y 2422 a inundaciones. También se revisó la información contenida en la base de datos de emergencias proporcionados por la UNGRD para la cual se revisaron los registros históricos sobre la cantidad de eventos ocurridos en el distrito de Medellín por avenidas torrenciales e inundaciones. Esta información se tomó como análisis de recurrencia, sin encontrarse con información espacial ya que no se encontró georreferenciada.

Como parte final del análisis y con el fin de clasificar adecuadamente las cuencas en el Distrito de Medellín y su respectiva priorización, se realizó la comparación entre los registros de eventos, las zonas definidas en amenaza alta y media y los resultados de los índices morfométricos.

Para realizar la priorización de las quebradas, se construyó una matriz compuesta por seis columnas: tres correspondientes a parámetros morfométricos como son: Relación de Relieve, Índice de Melton

e Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET), y las otras tres asociadas a información secundaria proveniente de los estudios del POT, del POMCA del río Aburrá y de las visitas técnicas realizadas por el DAGRD. Cada columna fue organizada en orden descendente, considerando el nivel de relevancia de las quebradas según el criterio evaluado. A la quebrada ubicada en el primer lugar de cada columna se le asignó el puntaje máximo, el cual se definió a partir del número total de quebradas registradas en la columna que contenía la mayor cantidad de elementos. A las siguientes quebradas se les asignaron puntajes decrecientes según su posición.

Por otro lado, en los casos en que una quebrada presentaba registros duplicados dentro de una misma columna, se conservó únicamente el valor más alto de cada variable.

Finalmente, se sumaron los valores asignados a cada quebrada en todas las columnas, generando un puntaje total acumulado. Toda la información procesada se especifica en el Anexo 3 Matriz_de_priorización.

Este análisis permitió definir la evaluación de la amenaza por inundación y avenidas torrenciales para las siguientes cuencas:

Tabla 28. Quebradas priorizadas.

Priorización	Quebrada	Priorización	Quebrada
1	Q. Santa Elena	31	Q. Piedras Blancas
2	Q. La Picacha	32	Q. Miserenga
3	Q. La Iguaná	33	Q. La Malpaso
4	Q. Doña María	34	Q. La Puerta
5	Q. La Presidenta	35	Q. La Pelahueso
6	Q. La Poblada	36	Q. La Madera
7	Q. Ana Diaz	37	Q. La Castro
8	Q. La Hondita	38	Q. Cantera Sur
9	Q. La Hueso	39	Q. La Quintana
10	Q. Potreritos	40	Q. La Chorrera - Molino
11	Q. La Volcana	41	Q. Paulita
12	Q. La Seca	42	Q. La Moñonga
13	Q. La Lejía	43	Q. La Bermejala
14	Q. La Escopetería	44	Q. La Leonarda
15	Q. La Sucia	45	Q. La Guayaba
16	Q. La Frisola	46	Q. La Larga
17	Q. La Aguacatala	47	Q. Agua Fría
18	Q. La Puerta - Borbollona	48	Q. La Despensa
19	Q. El Ñato	49	Q. La Honda
20	Q. La Astillera	50	Q. Minitas
21	Q. Altavista	51	Q. La Cañada
22	Q. Zúñiga	52	Q. La Arenera
23	Q. El Hato	53	Q. La García

Priorización	Quebrada	Priorización	Quebrada
24	Q. Cañaveralejo - Zancudo	54	Q. La Zorrita
25	Q. La Gómez	55	Q. La Potrera
26	Q. La Guayabala	56	Q. La Mauala
27	Q. El Ahorcado	57	Q. La Manguala
28	Q. La Rafita - Chorro Hondo	58	Q. La Rafita
29	Q. La Limona	59	Q. La Candela
30	Q. Piedra Gorda	60	Q. El Rosario

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

A partir de la priorización las de cuencas, se definen los tramos a evaluar desde el componente hidrológico (determinación de caudales máximos para los diferentes periodos de retorno) y el análisis hidráulico teniendo como base la información topográfica que es tomada en función de un levantamiento LIDAR (*Light Detection and Ranging)* el cual permite la construcción de un modelo digital del terreno de 1,0 m x 1,0 m de tamaño de pixel, información base que conlleva al análisis de la amenaza a una mayor escala que la definida para el tipo de estudios dentro del Decreto nacional 1077 de 2015.

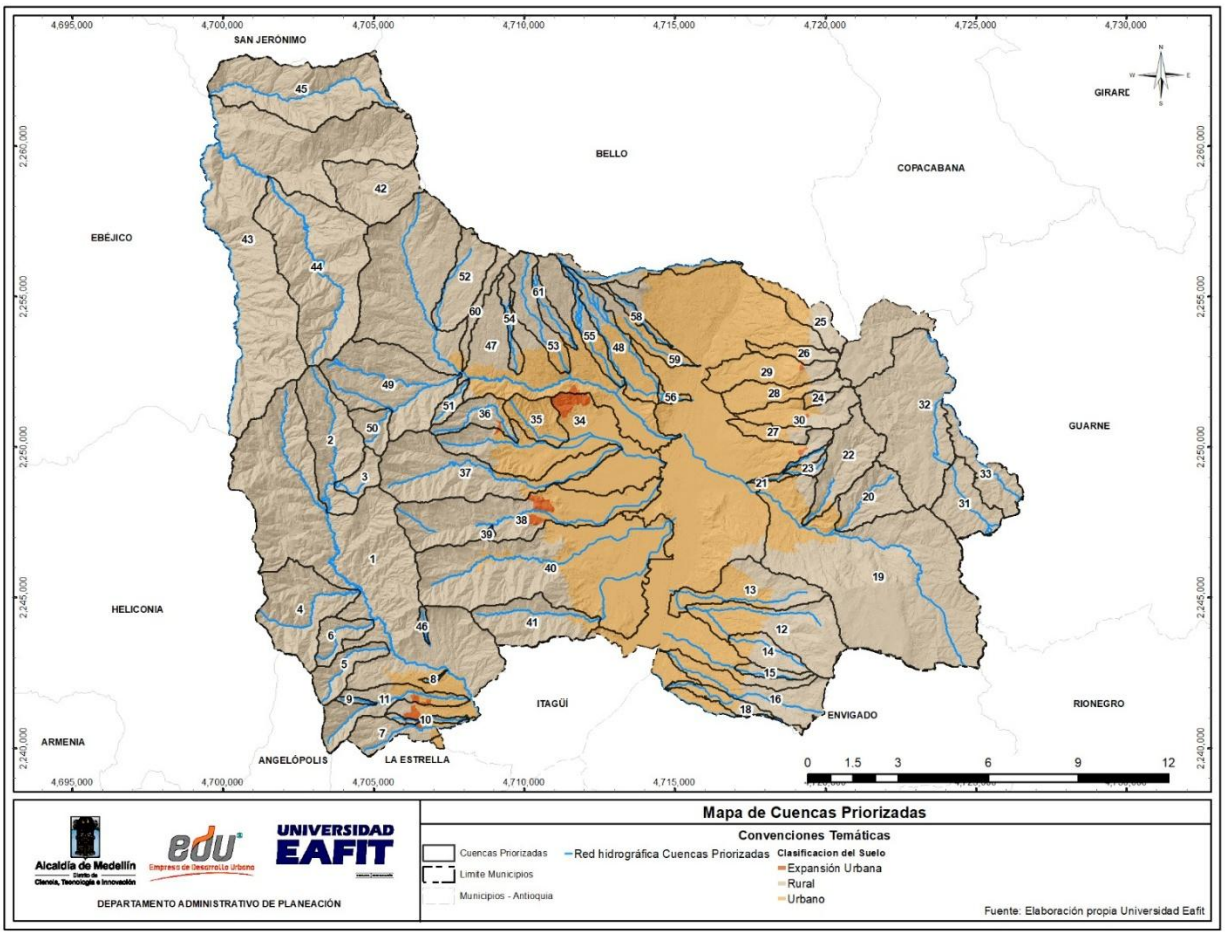


Ilustración 138. Mapa de delimitación de las cuencas hidrográficas priorizadas

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

La ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos, como las inundaciones y las avenidas torrenciales, representa una amenaza significativa para la seguridad de las comunidades, la infraestructura y los ecosistemas. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo principal la estimación de caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno, los cuales sirven como insumo fundamental para la evaluación del nivel de amenaza por inundación y flujos torrenciales en el área de estudio.

El análisis se fundamentó en la caracterización detallada de las condiciones fisiográficas, climáticas e hidrológicas de la cuenca, incorporando registros históricos de precipitación, así como información topográfica, edafológica y de cobertura del suelo. Para la estimación de caudales máximos, debido a la ausencia de una red de monitoreo de caudales con registros estadísticamente representativos en el tiempo (largo plazo) y en el espacio (diferentes escalas de cuenca), se utilizaron varios modelos

lluvia-escorrentía que permitieron reproducir la respuesta de las cuencas ante la ocurrencia de eventos extremos.

Se utilizaron las metodologías de hidrógrafas unitarias del NRCS (*Natural Resources Conservation Service*, 2007), Snyder (Snyder, 1938), Williams & Hann y Clark, así como el método racional (cuencas menores). Para su implementación, primero se estimaron los parámetros morfométricos de las cuencas priorizadas, con base en los cuales se determinaron las características espaciotemporales de las respectivas tormentas de diseño; posteriormente, se estimaron hidrógrafas unitarias, que, al combinarse (convolución) con las tormentas de diseño (hietogramas), permitieron obtener las hidrógrafas de respuesta de las cuencas ante la ocurrencia de eventos con período de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años de período de retorno.

Se debe tener en cuenta las limitaciones y condiciones de desarrollo de estos métodos empíricos, ya que estos fueron desarrollados y parametrizados en otras regiones del mundo con condiciones climatológicas, hidrológicas y topográficas diferentes a las del área de estudio. Sin embargo, son las herramientas disponibles ante la escasez de registros hidrométricos.

Este estudio hace parte integral de un enfoque de gestión del riesgo de desastres, en el cual se busca no solo delimitar zonas potencialmente inundables o susceptibles a avenidas torrenciales, sino también proporcionar criterios técnicos para el diseño de obras de mitigación, la planificación territorial y la toma de decisiones informadas por parte de autoridades ambientales y entidades de ordenamiento.

La información detallada del procesamiento para la obtención de cada una de las características y componentes presentados en el siguiente capítulo se encuentra en el Anexo 5.

8.1 INFORMACIÓN UTILIZADA

Se describe la información topográfica, climatológica, edafológica y de cobertura del suelo utilizada en la estimación de los caudales máximos de las cuencas priorizadas.

8.1.1 Información cartográfica

La cartografía empleada en el análisis hidrológico corresponde a curvas de nivel y red de drenaje de diferentes fuentes de información con el fin de abarcar en su totalidad el área municipal del Distrito. De esta manera se utilizó la información disponible en el estudio de Cartografía Digital de Antioquia – Cartoantioquia, elaborada por la Comisión Tripartita (Gobernación de Antioquia, Alcaldía de Medellín y Área Metropolitana) EPM, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC- y el Instituto para el Desarrollo de Antioquia – IDEA, con escalas que varían entre 1:2.000 y 1:10.000 para la zona estudiada. Como insumo se utilizó la información mostrada en la Tabla 29.

Tabla 29. Información de curvas de nivel utilizada

Plancha	Escala	Información
146	1:10.000 1:5.000 1:2.000	Curvas de nivel, Red de Drenaje
147	1:10.000 1:5.000 1:2.000	Curvas de nivel, Red de Drenaje

Fuente: IGAC

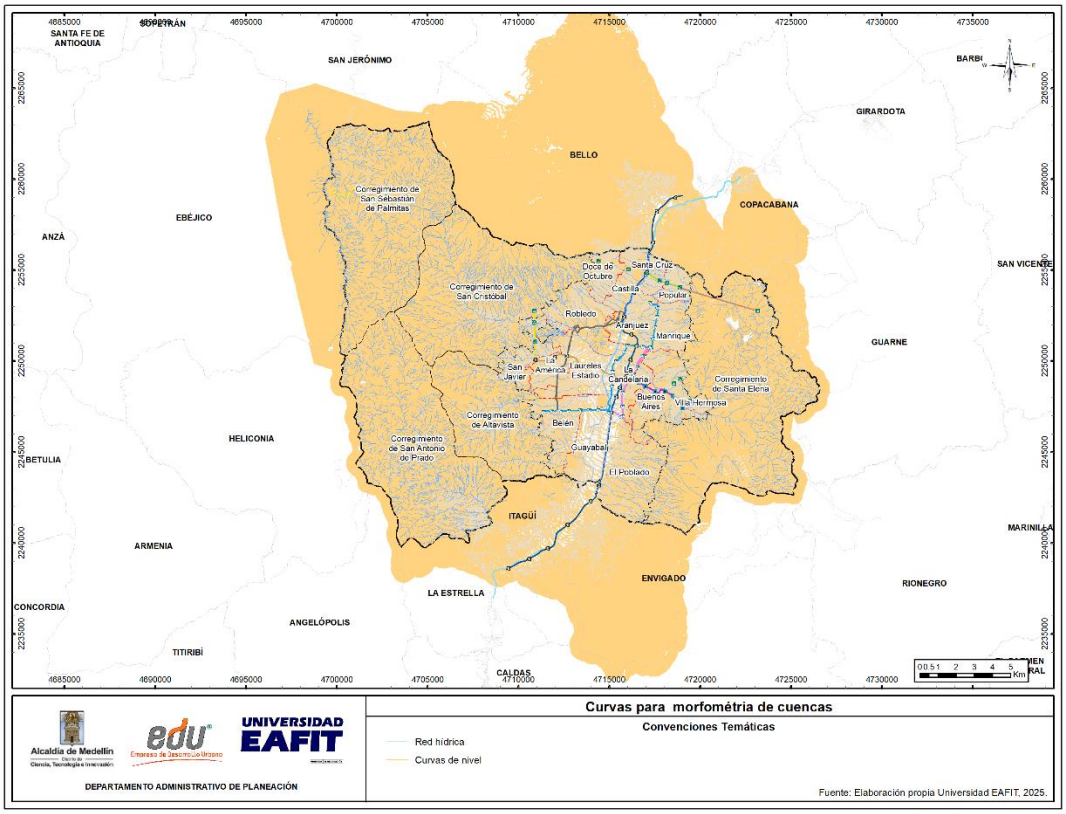


Ilustración 139. Mapa de información cartográfica empleada para el análisis hidrológico

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

8.1.2 Información hidroclimática

En la zona de estudio y sus respectivas cuencas hidrográficas no se cuenta con registros confiables de caudal. Por lo tanto, en el estudio hidrológico se utilizó únicamente información de precipitación registrada en la red de estaciones operada por EPM e IDEAM. En la Tabla 30 se presenta la información de las estaciones con información de Intensidad-Duración-Frecuencia en el área de estudio, mientras que en la Ilustración 140 se presenta su localización espacial y su respectiva área de influencia, la cual fue definida con base en la metodología de polígonos de Thiessen.

Tabla 30. Estaciones con información de precipitación

Código	Nombre	Entidad	Período Registro	Tipo de información
N/A	Gerona	EPM	1990-2025	IDF
2308024	Vasconia	EPM	1990-2025	IDF
2701034	Mazo	EPM	1990-2025	IDF
2701035	Chorrillos	EPM	1990-2025	IDF
2701037	Fabricato	EPM	1990-2025	IDF
2701038	San Antonio	EPM	1990-2025	IDF
2701045	Villahermosa	EPM	1990-2025	IDF
2701046	San Cristóbal	EPM	1990-2025	IDF
2701047	Medellín	EPM	1990-2025	IDF
2701093	Ayurá	EPM	1990-2025	IDF
27010770	El Chuscal	IDEAM	1970-2024	Serie Diaria
26230180	Llanos de San Juan	IDEAM	1991-2024	Serie Diaria

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

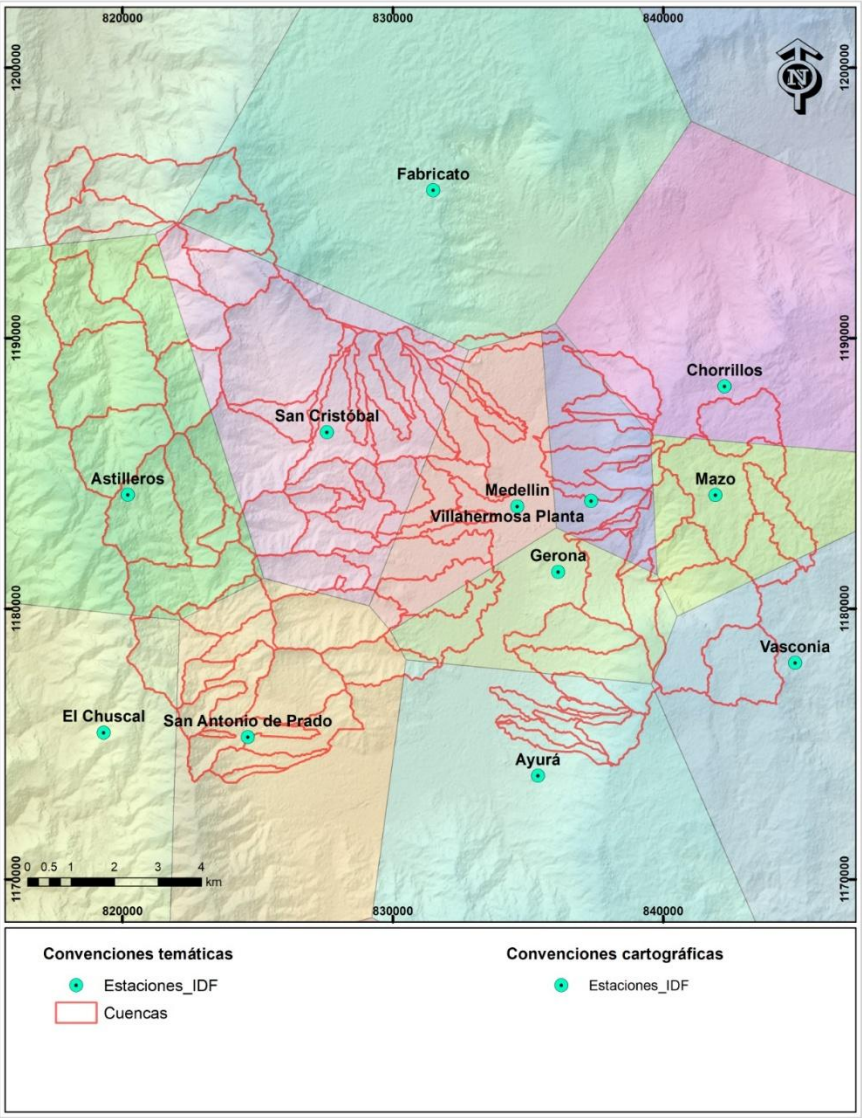


Ilustración 140. Estaciones pluviométricas en la zona de estudio y polígonos de Thiessen

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

8.1.3 Usos del suelo y cobertura vegetal

La permeabilidad de los suelos y su cobertura vegetal es uno de los principales componentes en el proceso de transformación de la lluvia en escorrentía. Para obtener las coberturas terrestres del Distrito, se utiliza como insumo principal el *feature class* "CoberturaTierra_UsoActual" de la *geodatabase* del POMCA del río Aburrá 2018. Luego mediante procesamiento geográfico (UNION) realizado en el software ArcGis v. 10.8, se incorporan las coberturas terrestres suministradas por planeación para los corregimientos de San Sebastián de Palmitas y San Antonio de Prado. Finalmente, se realiza una edición de coberturas de todo el distrito, utilizando la ortofoto para el Distrito de Medellín del año 2024 disponible en el servidor de mapas del Distrito, ajustando las zonas

que han venido ocupándose con la categoría de tejido urbano discontinuo y continuo. En la Ilustración 141 se presenta la distribución de las coberturas en el Distrito de Medellín.

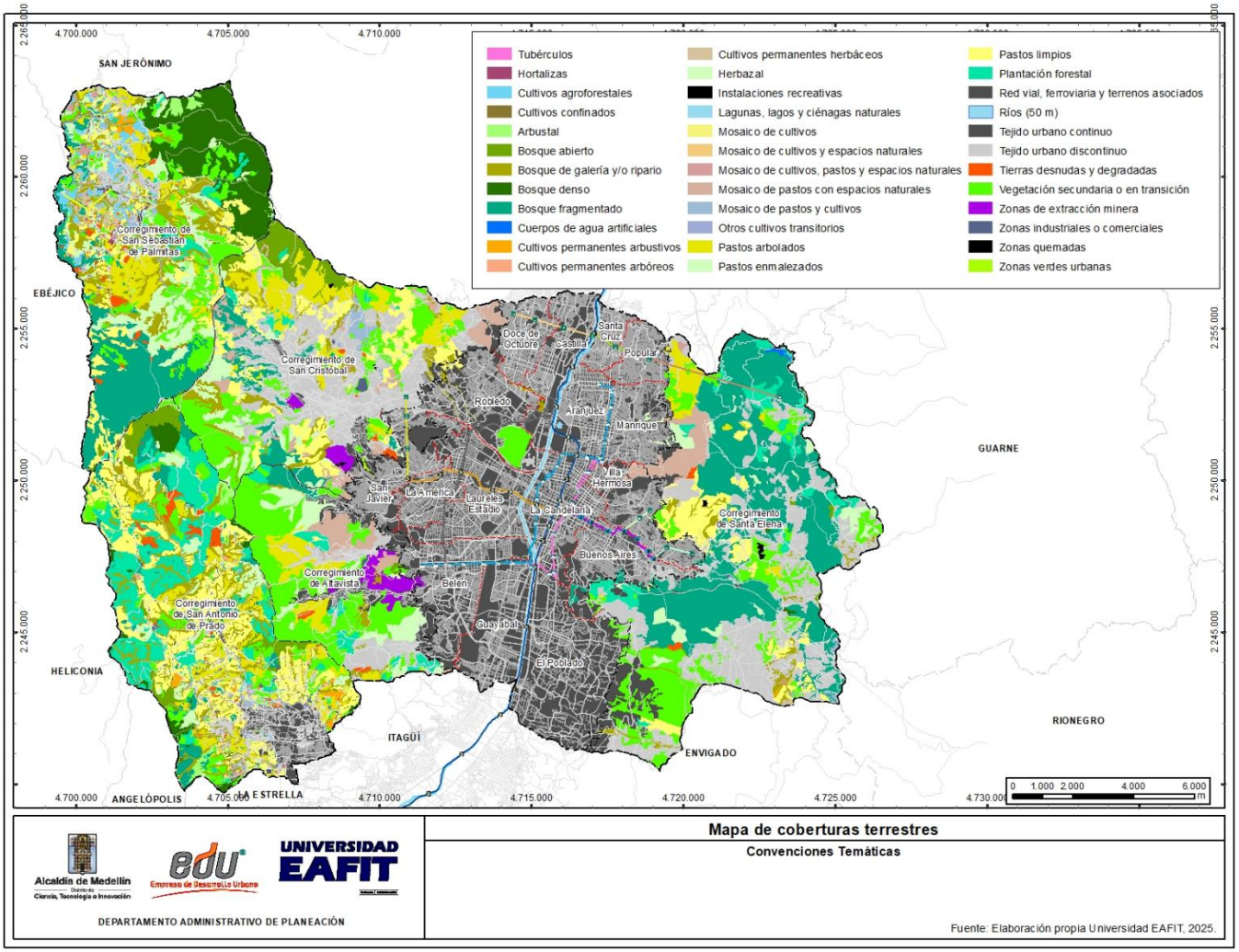


Ilustración 141. Mapa de Coberturas

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

8.1.4 Edafología

Edafología es la rama de la geología y de la agronomía que se encarga del análisis del suelo como un sistema natural, evaluando sus propiedades físicas, químicas, biológicas y mineralógicas, y su influencia en procesos ecológicos, agrícolas e hidrológicos. El estudio hidrológico conto con información del Estudio general de suelos y zonificación de tierras. Departamento de Antioquia. Escala 1: 100.000 elaborado por el IGAC en el año 2007. En la Ilustración 142 se presenta la zonificación de suelos en el área de interés.

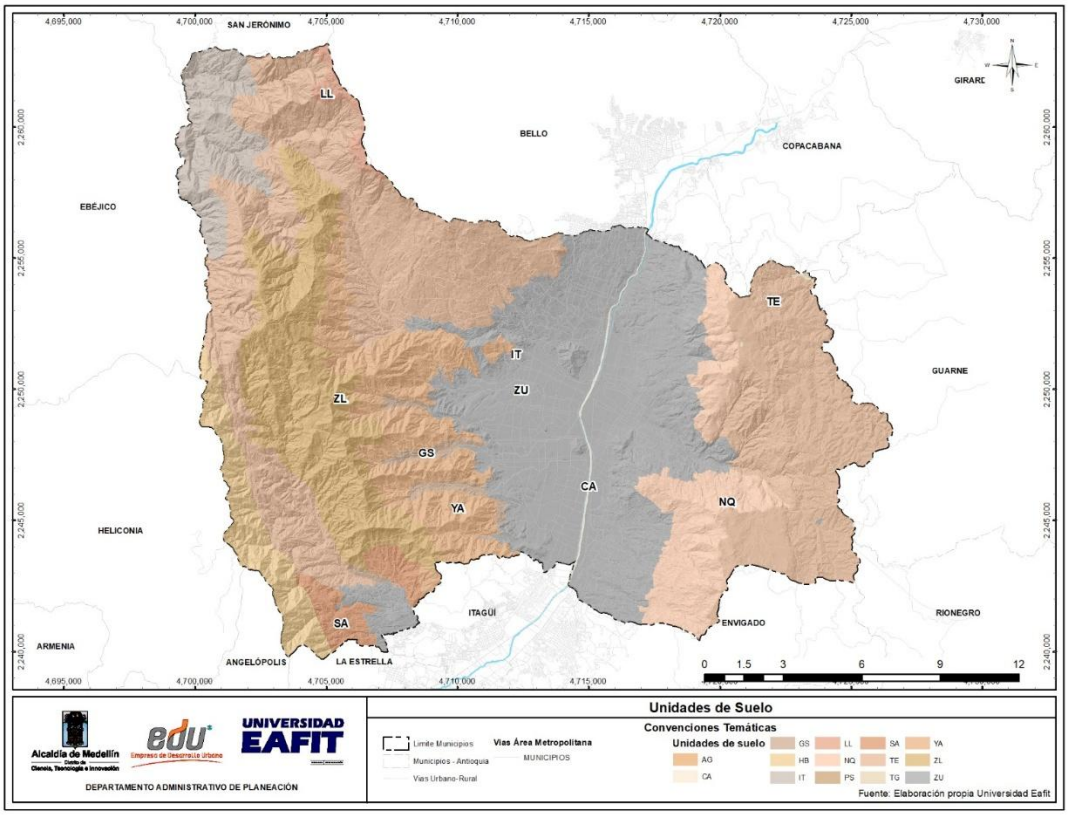


Ilustración 142. Mapa de unidades de suelo en el área de interés

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

8.2 PROCESAMIENTO DEL MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT)

Un modelo digital de terreno (MDT) es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el terreno. Con el objetivo de caracterizar la morfometría las cuencas estudiadas, enfocada determinar la respuesta del terreno ante un evento de precipitación, se construyó un modelo digital de terreno a partir de la información cartográfica existente.

La construcción del MDT generalmente parte de cartografía topográfica en formato vectorial, que puede incluir curvas de nivel, puntos, líneas de drenaje y otros objetos cartográficos. Estos elementos se integran en un proceso de interpolación espacial con el fin de obtener una superficie continua de elevación. La precisión del MDT depende de la escala y calidad de la cartografía base, así como del método de interpolación utilizado; para este caso se utilizó la información presentada en el numeral 8.1.1. Una vez construido el MDT a partir de las curvas de nivel existentes se realizó un procedimiento de adecuación hidrológica con el objetivo de garantizar la topología del drenaje en el área estudiada.

8.2.1 Construcción del MDT

Con base en la información cartográfica disponible se realizó la interpolación del MDT, con una resolución de píxel de 2 m, mediante la implementación del algoritmo ANUDEM, el cual es una metodología desarrollada específicamente para la generación de modelos continuos e hidrológicamente consistentes, a partir de curvas de nivel, puntos de elevación y redes de drenaje. Mediante una interpolación basada en funciones tipo spline y un proceso iterativo de ajuste. ANUDEM garantiza que el modelo resultante no solo represente suavemente la topografía, sino que también respete la conectividad y dirección de flujo del agua, eliminando depresiones artificiales y mejorando la precisión hidrológica del modelo (Hutchinson, 1996).

Como se describe en la sección anterior previo a la incorporación de la información de drenajes al proceso de interpolación, se identificó una discrepancia espacial entre el DEM y la red de drenaje oficial del distrito, evidenciando una falta de coherencia hidrológica. Finalmente, En la Ilustración 143 se presenta el MDT utilizado en el estudio hidrológico.

Topología de la red de drenaje

La topología se refiere a la relación espacial y jerárquica entre los elementos de la red de drenaje: canales, tuberías, colectores, sumideros, quebradas, etc. Es decir, quién desemboca en quién, el orden de flujo, y cómo están conectados. Con el objetivo de tener una red de drenaje que conceptualmente represente la dinámica de las corrientes superficiales del área de estudio, evitando así errores mayores asociados a la interpolación del modelo digital del terreno y la respectiva delimitación de cuencas hidrográficas. Entre las principales actividades realizadas se encuentran:

- Empalme de drenajes “colgantes”: mediante herramientas SIG se completan los drenajes hasta que estos se encuentren topológicamente, garantizando el transito completo de los caudales a través de la red, evitando subestimación de caudales en la modelación hidráulica e hidrológica.
- Conexión de cauces subterráneos: aunque se considera complejo identificar los drenajes subterráneos, se realizó la tarea de empalmar los drenajes mediante criterio experto, con el fin de minimizar errores en la caracterización espacial de caudales.
- Esqueletonización de la red de drenaje: se convierten cauces de drenaje “doble” a drenaje sencillo, con un objetivo idéntico a los anteriores. Este proceso evita la generación de flujos paralelos y errores de las cuencas delimitadas.
- Validación de conexión de nodos: mediante herramientas SIG se garantizó que todos los nodos de la red tuviesen conexión entre ellos.
- Corrección SIG: con base en múltiples herramientas SIG se corrigieron errores en la digitalización de la información, permitiendo tener un control de calidad sobre las operaciones SIG realizadas en procesos subsiguientes (estimación de longitudes y pendientes de cauce).

Corrección del modelo digital de terreno

Con el objetivo de caracterizar la variabilidad espacial de los caudales máximos, en conjunto con las correcciones topológicas se realizó una adecuación hidrológica del modelo de elevación generado. Que si bien se realizó con base en uno de los algoritmos en el estado del arte (ANUDEM), comprende un proceso iterativo que no garantiza el drenaje a través de la red. Así, se realizaron dos procedimientos básicos, que minimizan las variaciones de las características morfométricas del terreno:

- *Stream burning:* consiste en bajar la elevación de la red de drenaje una altura determinada con el objetivo de evitar errores al momento de la digitalización de la red de drenaje, donde esta se cruza con curvas de nivel de forma no concuerda con la realidad del terreno (O'Callaghan, 1984).
- *Stream breaching:* consiste en atravesar obstáculos que no son posibles de eliminar durante la construcción del DTM, tales como vía, puentes, *box culverts* (cortos), entre otros. Este algoritmo tiene limitaciones con respecto a la longitud de los obstáculos a atravesar, por lo que solo es aceptable en tramos cortos. Así, esta actividad se complementa con las correcciones topológicas descritas anteriormente (Lindsay, 2016).

Es importante tener en consideración que, dentro del proceso de trazado de cuencas, se tuvo en cuenta la aplicación del procedimiento "*Stream burning*" y "*Stream breaching",* partiendo de las limitaciones y beneficios que otorga cada uno, y que para los casos de elementos en coberturas de gran longitud como ocurre en algunos de los elementos que atraviesan la zona urbana del Distrito, la corrección mediante la incisión parcial de la red de drenaje disponible de la cartografía del Plan de Ordenamiento Territorial – Acuerdo 048 de 2014 con la finalidad de permitir el drenaje adecuadamente sobre la superficie del terreno y la definición adecuada de cada una de las cuencas de interés.

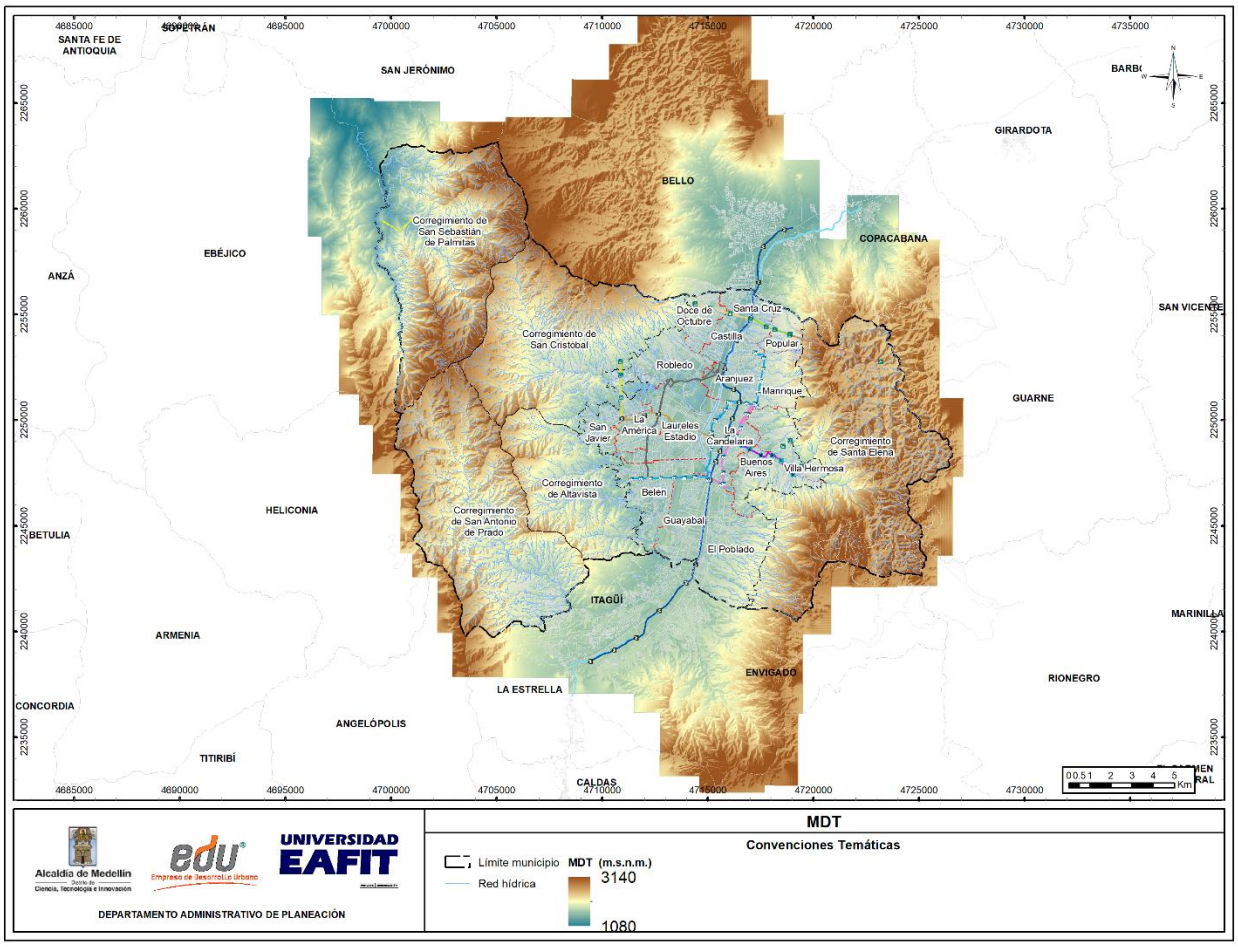


Ilustración 143. Mapa del MDT hidrológicamente corregido

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

8.2.2 Delimitación de cuencas

Con base en el MDT generado, utilizando la herramienta SIG Whitebox Tools (Lindsay, 2016), se realizó la delimitación de las cuencas priorizadas. Para ello se determinó el mapa de direcciones de flujo mediante el algoritmo D8, a partir del cual es posible determinar las celdas (pixeles) que drenan hasta los diferentes puntos de control. En la Ilustración 144 se presentas el mapa de delimitación de las cuencas hidrográficas asociadas a las corrientes priorizadas, cuyas coordenadas se presentan en la Tabla 31.

Tabla 31. Ubicación de los puntos de cierre de las cuencas priorizadas. MAGNA Sirgas Origen Nacional

ID	Cuenca	X (m)	Y (m)
1	Q. Santa Elena	4.717.699	2.248.497
2	Q. La Picacha	4.714.601	2.248.953
3	Q. La Iguana	4.715.191	2.250.370
4	Q. Doña María	4.708.624	2.241.125

ID	Cuenca	X (m)	Y (m)
5	Q. La Presidenta	4.715.358	2.244.680
6	Q. La Poblada	4.715.035	2.245.206
7	Q. Ana Diaz	4.713.257	2.249.942
8	Q. La Hondita	4.719.290	2.251.269
9	Q. La Hueso	4.714.673	2.249.429
10	Q. Potreritos	4.707.918	2.252.445
11	Q. La Volcana	4.716.982	2.242.677
12	Q. La Seca	4.717.247	2.255.900
13	Q. La Lejia	4.703.342	2.259.517
14	Q. La Escopetería	4.716.827	2.243.749
15	Q. La Sucia	4.698.796	2.262.753
16	Q. La Frisola	4.701.480	2.258.977
17	Q. La Aguacatala	4.714.509	2.243.278
18	Q. La Puerta - Borbollona	4.711.502	2.252.469
19	Q. El Ñato	4.720.329	2.247.261
20	Q. La Astillera	4.703.453	2.247.822
21	Q. Altavista	4.714.889	2.247.541
22	Q. Zúñiga	4.714.771	2.241.915
23	Q. El Hato - La Guayaba	4.709.750	2.252.411
24	Q. Canaveral - El Zancudo	4.717.357	2.253.554
25	Q. La Gómez	4.713.201	2.251.990
26	Q. La Guayabala	4.712.538	2.244.313
27	Q. El Ahorcado	4.716.714	2.250.869
28	Q. la Rafita - Chorro Hondo	4.717.391	2.248.804
29	Q. La Limona	4.708.431	2.241.010
30	Q. Piedra Gorda	4.724.102	2.249.446
31	Q. Piedras Blancas	4.723.413	2.253.864
32	Q. Miserenga	4.699.541	2.261.651
33	Q. Malpaso	4.715.556	2.251.550
34	Q. La Puerta	4.707.079	2.253.924
35	Q. La Pelahueso	4.711.481	2.250.257
36	Q. La Madera	4.717.244	2.256.109
37	Q. La Castro	4.719.263	2.247.407
38	Q. La Cantera Ramal Sur	4.714.918	2.253.335
39	Q. La Quintana	4.715.848	2.252.713
40	Q. La Chorrera - El Molino	4.716.527	2.251.775
41	Q. La Paulita	4.714.743	2.242.000
42	Q. La Moñonga	4.714.396	2.251.809
43	Q. La Bermejala	4.716.151	2.252.469
44	Q. La Leonarda	4.709.766	2.250.155
45	Q. La Guayaba	4.708.939	2.247.418
46	Q. La Larga	4.704.540	2.245.230
47	Q. Agua Fría	4.707.952	2.252.533
48	Q. La Despensa	4.705.513	2.243.262

ID	Cuenca	X (m)	Y (m)
49	Q. La Honda	4.716.938	2.251.122
50	Q. Minitas	4.703.705	2.248.797
51	Q. La Cañada	4.707.452	2.242.588
52	Q. La Arenera	4.705.613	2.251.214
53	Q. La García	4.711.754	2.253.278
54	Q. La Zorrita	4.705.100	2.241.507
55	Q. La Potrera	4.708.170	2.252.284
56	Q. La Mauala	4.708.165	2.240.950
57	Q. La Manguala	4.708.187	2.241.603
58	Q. La Rafita	4.718.611	2.249.126
59	Q. La Candela	4.704.991	2.244.256
60	Q. El Rosario	4.723.900	2.251.531

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

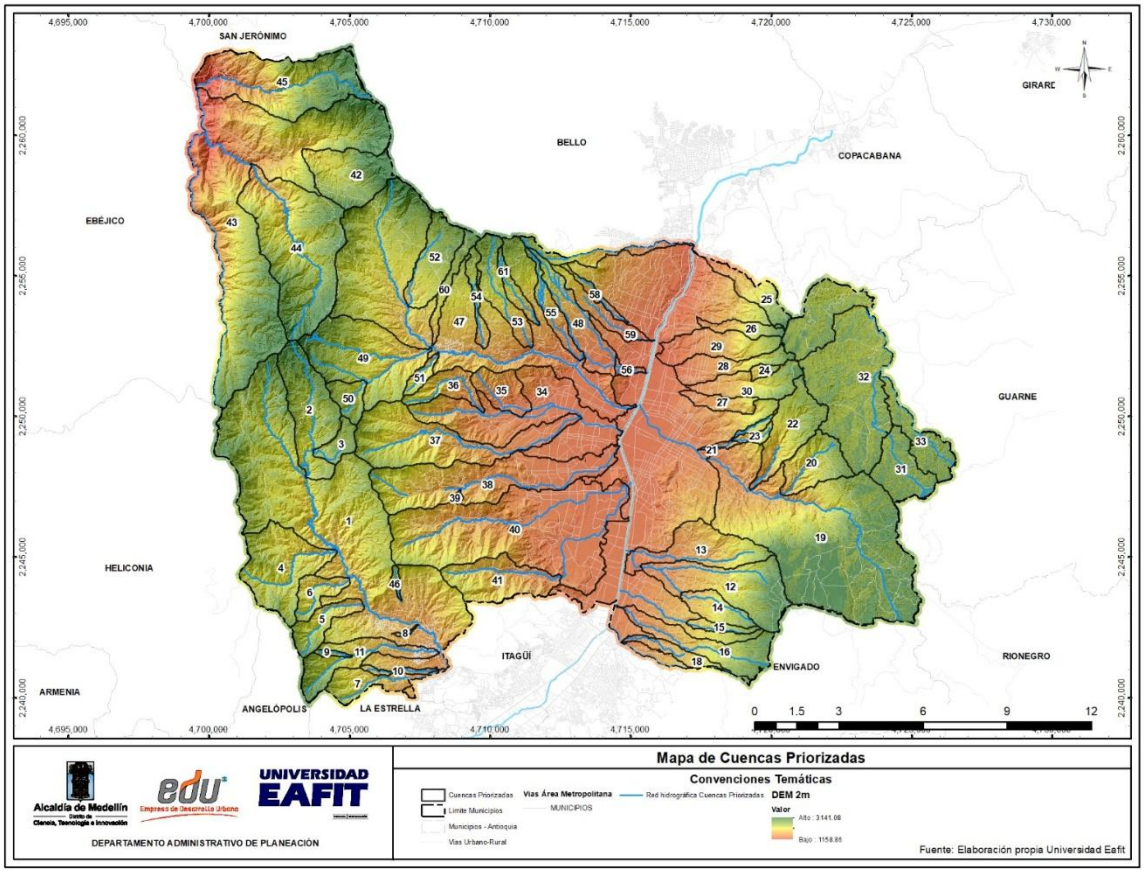


Ilustración 144. Mapa de delimitación de las cuencas hidrográficas priorizadas

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

8.3 CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS

El área de la cuenca hidrográfica es uno de los parámetros más determinantes en el proceso de transformación de la lluvia en escorrentía, ya que define el volumen espacial donde interactúan los distintos componentes hidrológicos. No obstante, existen otros parámetros morfométricos igualmente relevantes que influyen en la respuesta hidrológica de la cuenca, entre los que se destacan:

- Perímetro de la cuenca
- Longitud del cauce principal
- Distancia entre la salida de la cuenca y su centro de gravedad
- Rango altitudinal (diferencia entre elevación máxima y mínima)
- Pendiente del cauce principal
- Pendiente media de la cuenca

Adicionalmente, indicadores como el factor de forma y el índice de compacidad, proporcionan información útil sobre la tendencia de respuesta hidrológica de la cuenca frente a eventos extremos, permitiendo inferir su potencial de concentración de caudales, tiempos de respuesta y comportamiento ante lluvias intensas.

Cuencas con formas alargadas, pendientes suaves y longitudes de flujo mayores tienden a presentar tiempos de concentración más largos, lo cual influye en la forma y el pico del hidrograma de escorrentía. Comprender esta relación es esencial para la correcta estimación de caudales máximos, ya que permite determinar la duración crítica de las tormentas de diseño utilizadas en los modelos lluvia–escorrentía.

Por su parte, el tiempo de concentración es una variable hidrológica fundamental que representa el intervalo necesario para que una gota de agua ubicada en el punto más alejado de la cuenca alcance la salida del sistema. Este parámetro es una consecuencia directa de la morfometría de la cuenca, ya que depende de factores como la longitud y pendiente del cauce principal, la pendiente promedio del terreno, el área drenada, y las características del relieve en general.

En la Tabla 32 se presentan los principales parámetros morfométricos de las cuencas priorizadas.

Tabla 32. Parámetros morfométricos de las cuencas priorizadas

ID	Cuenca	Parámetros									
		A (km^2)	P (km)	L cauce (km)	L cuenca (km)	CMaxC m.s.n.m.	CMinC m.s.n.m.	P cauce (%)	CMax Cuenca m.s.n.m.	CMin Cuenca m.s.n.m.	P cuenca (%)
1	Q. Santa Elena	35,56	41,90	12,50	12,76	2740	1526	9,7	2800	1526	36,8
2	Q. La Picacha	10,69	29,32	11,96	12,15	2533	1464	8,9	2540	1464	36,5
3	Q. La Iguaná	50,96	54,50	17,66	17,84	3135	1458	9,5	3135	1458	41,5
4	Q. Doña María	61,43	52,77	19,59	19,77	3095	1621	7,5	3105	1621	54,0
5	Q. La Presidenta	8,72	18,70	6,46	6,62	2795	1502	20,0	2800	1502	40,1
6	Q. La Poblada	13,57	23,08	7,34	7,50	2795	1488	17,8	2800	1488	36,1
7	Q. Ana Diaz	9,25	27,04	10,74	10,99	2629	1478	10,7	2660	1478	47,7
8	Q. La Hondita	0,40	3,73	1,06	1,39	2460	1921	50,8	2493	1921	55,4
9	Q. La Hueso	24,75	33,91	12,48	12,73	2629	1462	9,3	2660	1462	36,3
10	Q. Potreritos	10,24	19,14	5,75	6,31	3023	1832	20,7	3095	1832	53,3
11	Q. La Volcana	0,72	7,26	2,42	3,07	2691	1783	37,5	2694	1783	39,2
12	Q. La Seca	3,66	14,28	5,33	5,91	2540	1436	20,7	2545	1436	44,6
13	Q. La Lejía	5,02	13,65	4,84	4,92	3115	1882	25,5	3120	1882	67,2
14	Q. La Escopetería	1,93	8,91	3,22	3,58	2630	1675	29,7	2640	1675	36,5
15	Q. La Sucia	76,36	56,02	16,67	16,88	3105	1085	12,1	3120	1085	70,7
16	Q. La Frisola	13,68	24,03	9,89	10,02	3105	1568	15,5	3105	1568	68,1
17	Q. La Aguacatala	4,50	19,37	7,26	7,65	2726	1506	16,8	2755	1506	32,6
18	Q. La Puerta - Borbollona	2,95	13,95	5,32	5,54	2790	1623	21,9	2805	1623	33,6
19	Q. El Ñato	3,42	11,50	3,49	3,61	2555	1733	23,6	2565	1733	53,9
20	Q. La Astillera	7,46	17,15	7,24	7,42	3095	2049	14,4	3105	2049	55,9
21	Q. Altavista	25,31	35,74	11,19	11,32	2410	1472	8,4	2410	1472	33,5
22	Q. Zúñiga	1,56	13,94	5,46	5,50	2590	1534	19,4	2614	1534	31,2
23	Q. El Hato - La Guayaba	1,13	10,78	4,17	4,49	2736	1759	23,4	2749	1759	32,9
24	Q. Cañaveral - El Zancudo	1,14	9,36	3,77	4,04	2570	1520	27,8	2570	1520	44,5
25	Q. La Gómez	1,72	12,99	5,10	5,44	2615	1526	21,4	2615	1526	31,9
26	Q. La Guayabala	4,68	14,48	5,49	5,59	2184	1542	11,7	2205	1542	46,0
27	Q. El Ahorcado	1,24	8,90	3,43	3,80	2116	1492	18,2	2260	1492	33,6
28	Q. la Rafita - Chorro Hondo	1,09	10,04	3,41	3,99	2392	1520	25,6	2392	1520	39,2

ID	Cuenca	Parámetros									
		A (km^2)	P (km)	L cauce (km)	L cuenca (km)	CMaxC m.s.n.m.	CMinC m.s.n.m.	P cauce (%)	CMax Cuenca m.s.n.m.	CMin Cuenca m.s.n.m.	P cuenca (%)
29	Q. La Limona	3,23	13,07	5,49	5,61	2602	1636	17,6	2602	1636	42,3
30	Q. Piedra Gorda	3,51	13,94	3,48	3,53	2526	2430	2,8	2605	2430	21,0
31	Q. Piedras Blancas	23,64	36,78	10,06	10,11	2526	2345	1,8	2605	2345	22,4
32	Q. Miserenga	10,13	22,61	8,43	8,51	3085	1170	22,7	3085	1170	70,2
33	Q. Malpaso	3,95	19,82	7,53	7,71	2620	1453	15,5	2620	1453	25,9
34	Q. La Puerta	3,71	12,62	4,32	4,56	2887	1945	21,8	2887	1945	36,3
35	Q. La Pelahueso	2,25	8,70	3,07	3,25	1865	1508	11,6	1924	1508	43,0
36	Q. La Madera	3,38	18,08	7,53	7,79	2740	1437	17,3	2740	1437	29,6
37	Q. La Castro	4,32	15,78	5,50	5,67	2557	1632	16,8	2560	1632	47,2
38	Q. La Cantera Ramal Sur	0,64	9,54	3,50	3,82	2285	1539	21,3	2290	1539	27,7
39	Q. La Quintana	1,85	13,83	5,34	5,52	2355	1452	16,9	2355	1452	25,0
40	Q. La Chorrera - El Molino	5,96	15,72	5,33	6,91	2545	1458	20,4	2580	1458	39,2
41	Q. La Paulita	1,24	11,24	4,12	4,74	2257	1534	17,5	2257	1534	23,5
42	Q. La Moñonga	3,63	17,14	6,23	6,41	2620	1488	18,2	2620	1488	26,3
43	Q. La Bermejala	3,60	14,84	5,71	5,77	2574	1450	19,7	2580	1450	32,2
44	Q. La Leonarda	2,13	11,10	4,97	5,15	2345	1586	15,3	2345	1586	52,8
45	Q. La Guayaba	0,10	1,88	0,54	0,64	1918	1731	34,6	1918	1731	46,8
46	Q. La Larga	6,55	16,97	5,49	5,70	2550	1900	11,8	2625	1900	61,9
47	Q. Agua Fría	1,31	13,06	5,42	5,53	2795	1828	17,9	2805	1828	35,0
48	Q. La Despensa	2,17	10,22	3,91	3,99	2740	1818	23,6	2740	1818	67,9
49	Q. La Honda	3,42	13,04	4,42	5,99	2545	1503	23,6	2580	1503	43,7
50	Q. Minitas	1,27	7,34	2,32	2,42	2638	2185	19,5	2660	2185	43,4
51	Q. La Cañada	0,09	2,93	0,93	1,24	1877	1705	18,6	1877	1705	23,5
52	Q. La Arenera	1,45	6,88	1,81	1,98	2655	2155	27,6	2775	2155	57,8
53	Q. La García	1,08	8,92	3,38	3,82	2720	1791	27,5	2734	1791	35,2
54	Q. La Zorrita	0,22	3,74	1,38	1,61	2575	2038	38,9	2575	2038	64,1
55	Q. La Potrera	0,72	5,90	2,13	2,39	2345	1816	24,8	2345	1816	53,5
56	Q. La Mauala	0,48	7,61	3,07	3,33	2055	1662	12,8	2055	1662	26,3
57	Q. La Manguala	3,97	16,68	6,66	6,98	2807	1656	17,3	2810	1656	50,3
58	Q. La Rafita	0,47	5,17	1,73	2,07	2198	1711	28,1	2200	1711	40,7

ID	Cuenca	Parámetros									
		A (km^2)	P (km)	L cauce (km)	L cuenca (km)	CMaxC m.s.n.m.	CMinC m.s.n.m.	P cauce (%)	CMax Cuenca m.s.n.m.	CMin Cuenca m.s.n.m.	P cuenca (%)
59	Q. La Candela	1,76	8,61	3,23	3,29	2449	1865	18,1	2485	1865	60,3
60	Q. El Rosario	4,14	19,19	5,82	5,90	2530	2395	2,3	2560	2395	25,3
	A: Área, P: Perímetro, L cauce: longitud de cauce, L cuenca: longitud de cuenca, CmaxC: cota máxima del cauce, CminC: cota mínima del cauce, P cauce: pendiente del cauce, CmaxCuenca: cota máxima de la cuenca, CminCuenca: cota mínima de la cuenca, P cuenca: pendiente de la cuenca										

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

8.4 ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS

El objetivo principal del estudio hidrológico en el marco de la gestión del riesgo por inundación y avenidas torrenciales consiste en determinar la respuesta hidrológica de la cuenca ante la ocurrencia de eventos extremos de precipitación. El proceso de estimación de los caudales máximos se esquematiza de forma simplificada en la Ilustración 145.

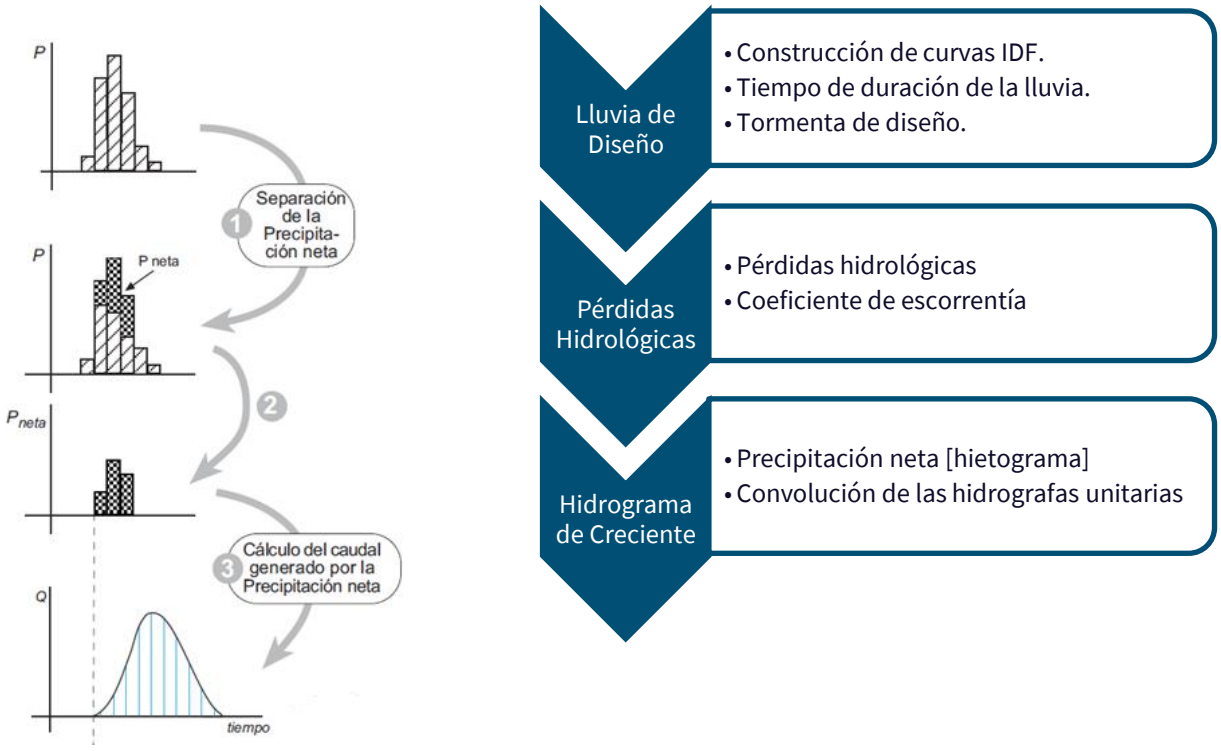


Ilustración 145. Esquematización del proceso de estimación de caudales máximos

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

El estudio hidrológico comprende el cálculo de caudales máximos para períodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años en las cuencas priorizadas. Como se describió anteriormente, debido a la escasez de información hidrológica que permita estimar caudales a partir de un análisis histórico (estadístico), se implementaron los siguientes modelos lluvia – escorrentía:

- Hidrógrafa unitaria del NRCS (“*Soil Conservation Service*”)
- Hidrógrafa unitaria de Snyder
- Hidrógrafa unitaria de Clark
- Hidrógrafa unitaria de Williams y Hann
- Método Racional

8.4.1 Caracterización de la tormenta de diseño

La caracterización de la tormenta de diseño consiste en estimar su variabilidad espaciotemporal en cada una de las cuencas estudiadas. Para ello se determinó que la duración de la tormenta fuese igual al tiempo de concentración de la cuenca, representando la condición hidrológica más crítica dado que toda el área de la cuenca contribuye simultáneamente a la escorrentía.

Con base en la duración de la lluvia y la información de IDF disponible en las estaciones de precipitación, fue posible estimar la intensidad del evento para los diferentes períodos de retorno. La distribución espacial de los eventos se determinó con base en la distribución espacial de las estaciones, asumiendo que el área de influencia de estas corresponde al polígono interpolado mediante la metodología propuesta por (Thiessen, 1911). La distribución es temporal de los eventos se realizó mediante la metodología de bloques alternantes propuesta por (Chow, 1988).

8.4.2 Duración de la tormenta

Como se describió anteriormente, se asumió una duración de tormenta igual al tiempo de concentración. En la literatura para el caso de cuencas no instrumentadas, existen dos métodos de tipo empírico para estimar el tiempo de concentración: el primero tipo trata de relacionar el TC con algunas de las características morfométricas de la cuenca y su cauce principal; el segundo tipo corresponde al método de la velocidad, que considera que el flujo en la cuenca se desarrolla como una combinación de un flujo laminar (a escala de ladera), un flujo concentrado superficial y el flujo presente propiamente en los canales de la red hídrica.

En este estudio hidrológico, dada la información disponible, se utilizaron solo ecuaciones del primer tipo, tales como las propuestas por: Temez, Kirpich, Clark, California Culverts Practice, Giandotti, S.C.S, Ven Te Chow, entre otras (ver numeral 3.1.2 3.1.2 Amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales del anexo 1). Sus fundamentos teóricos pueden ser revisados en Campo y Múnera (1997) y Vélez y Botero (2010).

Debido a las diferentes formas en las que fueron concebidas las expresiones para determinar el tiempo de concentración (mostrados en el anexo 1 de Metodología), se tiene una alta variabilidad en los resultados por lo cual se utilizó un método robusto para la selección final tiempo de concentración de las cuencas priorizadas. Así, con el objetivo de excluir los tiempos de concentración que se alejaban excesivamente de la mediana, se descartaron aquellos tiempos que estuvieron por fuera de una banda de confianza con un ancho de un (1) IQR y centrada en la mediana.

Con el objetivo de excluir los tiempos de concentración que se alejaban excesivamente de la mediana, se descartaron aquellos tiempos que estuvieron por fuera de una banda de confianza con un ancho de un (1) IQR y centrada en la mediana, correspondiente a un método estadístico para determinar valores atípicos y establecer una banda de confianza para los resultados de la variable, en este caso, el tiempo de concentración asociado a cuencas. Con el fin de dar claridad al procedimiento utilizado, es importante indicar que el Rango Intercuartílico (IQR) es una medida de

dispersión que se calcula restando el primer cuartil (Q1) del tercer cuartil (Q3). Al usar el IQR centrado en la mediana, se establece un rango de valores que se considera "aceptable" o "normal" y éste no corresponde al promedio de los valores obtenidos.

Para la mayoría de las cuencas, se excluyó el valor extremo de los datos para no generar alta dispersión y obtener así un promedio más representativo de los valores analizados. Se indican los pasos a seguir para determinar el tiempo de concentración seleccionado o escogido:

1. Se determina la Mediana de los datos excluyendo el valor extremo
2. Se calcula el Rango Intercuartílico (IQR) como la diferencia entre el primer cuartil (Q1) el tercer cuartil (Q3)
3. Se identifica el límite inferior y superior como "*Mediana ± IRQ/2*"
4. Se calcula el Tc final como el promedio de los datos dentro de los límites.

En la Tabla 33 se presentan los resultados estimados para las cuencas estudiadas mediante los principales métodos utilizados, a manera de ejemplo se indican algunos resultados de los métodos trabajados pero los estadísticos fueron determinados para el conjunto de datos completos donde finalmente se encontró el tiempo de concentración a ser considerado dentro del análisis hidrológico. Los datos completos se encuentran en el anexo 5 Hidrologia - Tiempos de concentracion_Tc.

Tabla 33. Tiempos de concentración obtenidos para las cuencas priorizadas

ID	Cuenca	Tiempos de concentración (minutos)							
		Kirpich	Témez	CCP	Giandotti	SCS	Mediana	IQR	Escogido
1	Q. Santa Elena	68,2	191,2	67,1	89,5	242,5	137,5	105,3	133,0
2	Q. La Picacha	68,1	187,8	68,0	70,9	170,3	98,8	48,9	102,0
3	Q. La Iguaná	89,8	249,6	89,9	100,8	302,8	154,7	110,4	159,0
4	Q. Doña María	106,4	282,3	106,3	118,3	352,7	179,8	152,0	167,0
5	Q. La Presidenta	31,1	100,9	31,1	44,8	74,2	59,9	50,5	61,0
6	Q. La Poblada	35,9	113,7	35,9	53,3	85,2	71,8	54,7	76,0
7	Q. Ana Diaz	58,4	167,1	57,9	61,7	161,0	88,7	47,1	93,0
8	Q. La Hondita	5,4	21,4	5,3	12,9	11,4	12,6	11,8	11,0
9	Q. La Hueso	69,2	192,3	68,6	83,7	166,4	123,0	78,8	123,0
10	Q. Potreritos	28,0	91,7	27,4	45,2	84,7	56,9	50,5	62,0
11	Q. La Volcana	11,5	42,4	11,5	17,4	23,8	22,2	16,8	24,0
12	Q. La Seca	26,4	86,5	26,4	35,2	58,8	47,5	29,9	49,0
13	Q. La Lejía	22,6	77,3	22,6	34,6	81,7	45,0	39,2	46,0
14	Q. La Escopetería	15,6	55,1	15,6	25,1	30,2	30,1	25,2	30,0
15	Q. La Sucia	78,2	228,0	78,1	99,7	281,7	160,8	143,5	161,0
16	Q. La Frisola	47,5	146,3	47,6	56,7	168,5	86,1	53,8	88,0
17	Q. La Aguacatala	36,3	113,9	36,1	41,1	86,2	54,9	36,2	56,0
18	Q. La Puerta - Borbollona	25,8	85,5	25,7	32,4	83,3	44,8	38,1	40,0
19	Q. El Ñato	18,1	61,2	18,1	32,8	61,4	36,5	36,6	32,0
20	Q. La Astillera	38,5	117,1	38,4	50,3	120,0	66,9	43,0	69,0
21	Q. Altavista	66,3	180,7	66,4	90,4	165,0	125,5	72,9	125,0
22	Q. Zúñiga	27,6	89,3	27,4	30,1	58,8	34,7	26,3	31,0
23	Q. El Hato - La Guayaba	20,9	70,2	20,8	25,0	68,5	29,8	25,4	27,0
24	Q. Canaveral - El Zancudo	18,1	63,0	18,1	23,0	35,8	28,2	20,1	26,0
25	Q. La Gómez	25,2	83,2	25,3	29,3	65,5	37,2	29,7	32,0
26	Q. La Guayabala	33,7	98,8	33,4	49,2	91,3	58,1	40,1	59,0
27	Q. El Ahorcado	19,8	63,5	18,3	26,0	39,4	31,8	22,2	31,0
28	Q. la Rafita - Chorro Hondo	17,3	59,3	17,3	23,6	34,9	28,2	19,3	29,0
29	Q. La Limona	28,8	91,4	28,8	37,2	73,2	48,7	37,7	47,0
30	Q. Piedra Gorda	41,3	91,8	32,9	72,0	210,4	67,3	38,0	70,0
31	Q. Piedras Blancas	110,4	223,2	96,2	160,6	582,3	152,0	89,3	141,0
32	Q. Miserenga	36,3	120,6	36,4	43,5	135,5	66,6	49,9	68,0
33	Q. Malpaso	38,6	119,0	38,6	42,3	86,6	57,3	38,0	53,0

ID	Cuenca	Tiempos de concentración (minutos)							
		Kirpich	Témez	CCP	Giandotti	SCS	Mediana	IQR	Escogido
34	Q. La Puerta	22,0	73,1	22,1	34,7	73,5	43,2	44,2	37,0
35	Q. La Pelahueso	21,6	63,6	20,4	39,0	45,6	39,9	30,9	40,0
36	Q. La Madera	37,0	116,5	37,0	38,7	101,8	52,7	36,8	47,0
37	Q. La Castro	29,4	92,3	29,4	40,8	96,6	52,3	42,8	51,0
38	Q. La Cantera Ramal Sur	18,9	62,6	18,9	23,1	46,1	23,4	20,4	22,0
39	Q. La Quintana	28,6	90,1	28,6	33,6	62,2	40,9	28,8	36,0
40	Q. La Chorrera - El Molino	26,6	86,8	26,3	39,8	56,8	51,0	43,7	52,0
41	Q. La Paulita	23,1	73,5	23,2	29,7	42,1	33,6	22,5	31,0
42	Q. La Moñonga	31,4	99,9	31,4	37,8	69,2	51,6	35,7	53,0
43	Q. La Bermejala	28,4	92,1	28,4	36,0	52,4	49,1	29,8	50,0
44	Q. La Leonarda	28,1	86,9	28,2	36,2	67,9	39,6	30,9	36,0
45	Q. La Guayaba	3,7	13,8	3,7	11,4	9,2	8,9	7,6	9,0
46	Q. La Larga	33,6	98,5	32,2	51,5	110,0	62,5	41,1	65,0
47	Q. Agua Fría	28,3	90,2	28,3	30,5	103,3	32,5	27,2	30,0
48	Q. La Despensa	19,8	66,8	19,8	29,0	59,4	36,1	34,8	30,0
49	Q. La Honda	21,7	73,2	21,5	32,0	48,4	42,9	29,9	43,0
50	Q. Minitas	14,3	46,6	14,1	27,5	43,2	28,7	27,4	24,0
51	Q. La Cañada	7,2	23,4	7,2	14,9	11,6	11,3	10,5	10,0
52	Q. La Arenera	10,3	36,1	9,5	22,7	28,4	22,8	18,9	24,0
53	Q. La García	16,7	58,0	16,6	22,5	47,9	28,4	26,4	25,0
54	Q. La Zorrita	7,3	27,5	7,3	12,8	19,9	13,4	13,6	12,0
55	Q. La Potrera	12,2	41,7	12,2	21,5	29,6	24,2	23,6	22,0
56	Q. La Mauala	20,8	62,5	20,9	28,0	44,5	25,5	18,5	23,0
57	Q. La Manguala	33,7	106,2	33,7	39,7	90,4	53,9	40,3	52,0
58	Q. La Rafita	9,9	34,8	9,9	18,1	21,0	19,0	16,5	17,0
59	Q. La Candela	19,0	60,7	18,5	30,6	58,9	33,9	33,4	29,0
60	Q. El Rosario	65,7	140,3	60,9	98,4	322,4	91,8	39,3	95,0

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

8.4.3 Distribución espacial de la tormenta

Para determinar la distribución espacial de la tormenta de diseño se realizó la intersección de las cuencas priorizadas con las áreas de influencia definidas para las estaciones de precipitación utilizadas (polígonos de Thiessen) mediante la utilización de herramientas SIG (ver Ilustración 140). En la Tabla 34 y Tabla 35 se presenta el área y el porcentaje superposición de cada cuenca en cada uno de los polígonos de influencia de las estaciones con información de IDF.

De esta manera fue posible determinar la magnitud de la tormenta de diseño, la cual se calculó como la magnitud de la tormenta estimada con base en cada una de las estaciones con curvas IDF ponderadas por el área de superposición definida en este análisis.

$$P_{cuenca} = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{A_i}{A_{total}} \cdot P_i \right)$$

Donde, P"cuenca" es la precipitación ponderada para la cuenca, en mm, Ai es el área de la cuenca asociada al polígono asociado a la estación i, en km^2, Pi es la precipitación en la estación i, en mm/h, A_"total" es el área total de la cuenca, en km^2

VIGILADA MINEDUCACIÓN

Tabla 34. Áreas de influencia de las estaciones con información IDF para cada cuenca (km^2)

ID	Cuenca	Código estación												
		1	27010770	26230180	2308024	2701034	2701035	2701037	2701038	2701045	2701046	2701047	2701093	2701115	Suma
1	Q. Santa Elena	8,61	0,00	0,00	14,28	9,38	0,00	0,00	0,00	3,30	0,00	0,00	0,00	0,00	35,56
2	Q. La Picacha	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,78	0,00	6,01	3,70	0,00	0,19	10,69
3	Q. La Iguaná	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,58	3,42	0,00	2,96	50,96
4	Q. Doña María	0,00	4,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	32,15	0,00	0,00	0,00	0,00	24,80	61,43
5	Q. La Presidenta	5,30	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,36	0,00	8,72
6	Q. La Poblada	10,15	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,36	0,00	13,57
7	Q. Ana Diaz	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,55	1,22	0,00	0,48	9,25
8	Q. La Hondita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,40
9	Q. La Hueso	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,58	6,68	0,00	0,48	24,75
10	Q. Potreritos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,28	0,00	0,00	2,96	10,24
11	Q. La Volcana	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,72	0,00	0,72
12	Q. La Seca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,42	0,00	0,00	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	3,66
13	Q. La Lejía	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00	0,00	4,79	0,00	0,00	0,00	5,02
14	Q. La Escopetería	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,80	0,00	1,93
15	Q. La Sucia	0,00	0,00	15,26	0,00	0,00	0,00	7,47	0,00	0,00	12,97	0,00	0,00	40,66	76,36
16	Q. La Frisola	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,99	0,00	0,00	8,69	13,68
17	Q. La Aguacatala	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,50	0,00	4,50
18	Q. La Puerta - Borbollona	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,95	0,00	0,00	0,00	2,95
19	Q. El Ñato	0,11	0,00	0,00	0,00	3,13	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	3,42
20	Q. La Astillera	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,46	7,46
21	Q. Altavista	7,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,17	0,00	0,75	4,67	0,97	0,00	25,31
22	Q. Zúñiga	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,56	0,00	1,56
23	Q. El Hato - La Guayaba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,13	0,00	0,00	0,00	1,13
24	Q. Canaveral - El Zancudo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00	1,02	0,00	0,00	0,00	0,00	1,14
25	Q. La Gómez	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,33	0,39	0,00	0,00	1,72

ID	Cuenca	Código estación												
		1	27010770	26230180	23080 24	27010 34	27010 35	27010 37	27010 38	27010 45	27010 46	27010 47	27010 93	27011 15	Suma
26	Q. La Guayabala	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,76	0,00	0,00	0,00	0,60	0,00	4,68
27	Q. El Ahorcado	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,23	0,00	0,01	0,00	0,00	1,24
28	Q. la Rafita - Chorro Hondo	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,07	0,00	0,00	0,00	0,00	1,09
29	Q. La Limona	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,23
30	Q. Piedra Gorda	0,00	0,00	0,00	0,80	2,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,51
31	Q. Piedras Blancas	0,00	0,00	0,00	1,04	17,76	4,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	23,64
32	Q. Miserenga	0,00	0,00	7,17	0,00	0,00	0,00	2,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,13
33	Q. Malpaso	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,32	2,64	0,00	0,00	3,95
34	Q. La Puerta	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,71	0,00	0,00	0,00	3,71
35	Q. La Pelahueso	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,25	0,00	0,00	0,00	2,25
36	Q. La Madera	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,08	0,00	0,11	1,38	0,81	0,00	0,00	3,38
37	Q. La Castro	0,16	0,00	0,00	0,00	2,41	0,00	0,00	0,00	1,74	0,00	0,00	0,00	0,00	4,32
38	Q. La Cantera Ramal Sur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,49	0,00	0,00	0,64
39	Q. La Quintana	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,46	1,39	0,00	0,00	1,85
40	Q. La Chorrera - El Molino	0,00	0,00	0,00	0,00	0,64	0,00	0,00	0,00	5,22	0,00	0,09	0,00	0,00	5,96
41	Q. La Paulita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,24	0,00	1,24
42	Q. La Moñonga	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,32	2,31	0,00	0,00	3,63
43	Q. La Bermejala	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	3,01	0,00	0,58	0,00	0,00	3,60
44	Q. La Leonarda	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,13	0,00	0,00	0,00	2,13
45	Q. La Guayaba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,10
46	Q. La Larga	0,00	4,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,31	6,55
47	Q. Agua Fría	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,31	0,00	0,00	0,00	1,31
48	Q. La Despensa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,17
49	Q. La Honda	0,00	0,00	0,00	0,00	0,54	0,00	0,00	0,00	2,89	0,00	0,00	0,00	0,00	3,42
50	Q. Minitas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,27	1,27
51	Q. La Cañada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09

ID	Cuenca	Código estación												
		1	27010770	26230180	23080 24	27010 34	27010 35	27010 37	27010 38	27010 45	27010 46	27010 47	27010 93	27011 15	Suma
52	Q. La Arenera	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52	0,00	0,00	0,93	1,45
53	Q. La García	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,08	0,00	0,00	0,00	1,08
54	Q. La Zorrita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22
55	Q. La Potrera	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,72	0,00	0,00	0,00	0,72
56	Q. La Mauala	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48
57	Q. La Manguala	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,97
58	Q. La Rafita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,47
59	Q. La Candela	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,76
60	Q. El Rosario	0,00	0,00	0,00	0,23	3,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,14

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 35. Porcentaje de áreas de influencia de las estaciones con información IDF para cada cuenca (%)

ID	Cuenca	Código estación												
		1	27010770	26230180	23080 24	27010 34	27010 35	27010 37	27010 38	27010 45	27010 46	27010 47	27010 93	27011 15	Suma
1	Q. Santa Elena	24,20	0,00	0,00	40,14	26,38	0,00	0,00	0,00	9,27	0,00	0,00	0,00	0,00	100
2	Q. La Picacha	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,29	0,00	56,28	34,66	0,00	1,77	100
3	Q. La Iguaná	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	87,48	6,71	0,00	5,81	100
4	Q. Doña María	0,00	7,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	52,33	0,00	0,00	0,00	0,00	40,37	100
5	Q. La Presidenta	60,74	0,00	0,00	0,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	38,55	0,00	100
6	Q. La Poblada	74,78	0,00	0,00	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,77	0,00	100
7	Q. Ana Diaz	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	81,62	13,14	0,00	5,24	100
8	Q. La Hondita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100
9	Q. La Hueso	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	71,04	27,01	0,00	1,96	100
10	Q. Potreritos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	71,08	0,00	0,00	28,92	100
11	Q. La Volcana	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	100
12	Q. La Seca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	93,41	0,00	0,00	6,59	0,00	0,00	0,00	0,00	100
13	Q. La Lejía	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,60	0,00	0,00	95,40	0,00	0,00	0,00	100
14	Q. La Escopetería	7,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	92,97	0,00	100
15	Q. La Sucia	0,00	0,00	19,98	0,00	0,00	0,00	9,78	0,00	0,00	16,99	0,00	0,00	53,25	100
16	Q. La Frisola	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	36,47	0,00	0,00	63,53	100
17	Q. La Aguacatala	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	100
18	Q. La Puerta - Borbollona	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100
19	Q. El Ñato	3,24	0,00	0,00	0,00	91,50	0,00	0,00	0,00	5,26	0,00	0,00	0,00	0,00	100
20	Q. La Astillera	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100
21	Q. Altavista	30,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,15	0,00	2,96	18,45	3,83	0,00	100
22	Q. Zúñiga	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	100
23	Q. El Hato - La Guayaba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100
24	Q. Canaveral - El Zancudo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,60	0,00	0,00	89,40	0,00	0,00	0,00	0,00	100
25	Q. La Gómez	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	77,55	22,45	0,00	0,00	100

ID	Cuenca	Código estación												
		1	27010770	26230180	2308024	2701034	2701035	2701037	2701038	2701045	2701046	2701047	2701093	2701115	Suma
26	Q. La Guayabala	6,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	80,48	0,00	0,00	0,00	12,73	0,00	100
27	Q. El Ahorcado	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99,19	0,00	0,81	0,00	0,00	100
28	Q. la Rafita - Chorro Hondo	1,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	98,51	0,00	0,00	0,00	0,00	100
29	Q. La Limona	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100
30	Q. Piedra Gorda	0,00	0,00	0,00	22,94	77,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100
31	Q. Piedras Blancas	0,00	0,00	0,00	4,38	75,13	20,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100
32	Q. Miserenga	0,00	0,00	70,72	0,00	0,00	0,00	29,23	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	100
33	Q. Malpaso	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	33,29	66,71	0,00	0,00	100
34	Q. La Puerta	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100
35	Q. La Pelahueso	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100
36	Q. La Madera	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	32,00	0,00	3,23	40,88	23,90	0,00	0,00	100
37	Q. La Castro	3,76	0,00	0,00	0,00	55,83	0,00	0,00	0,00	40,41	0,00	0,00	0,00	0,00	100
38	Q. La Cantera Ramal Sur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	23,73	76,27	0,00	0,00	100
39	Q. La Quintana	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25,02	74,98	0,00	0,00	100
40	Q. La Chorrera - El Molino	0,00	0,00	0,00	0,00	10,77	0,00	0,00	0,00	87,64	0,00	1,59	0,00	0,00	100
41	Q. La Paulita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	100
42	Q. La Moñonga	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	36,25	63,75	0,00	0,00	100
43	Q. La Bermejala	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,32	0,00	0,00	83,61	0,00	16,05	0,00	0,00	100
44	Q. La Leonarda	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100
45	Q. La Guayaba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100
46	Q. La Larga	0,00	67,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	27,56	0,00	0,00	0,00	0,00	4,78	100
47	Q. Agua Fría	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100
48	Q. La Despensa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100
49	Q. La Honda	0,00	0,00	0,00	0,00	15,63	0,00	0,00	0,00	84,37	0,00	0,00	0,00	0,00	100
50	Q. Minitas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100
51	Q. La Cañada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100

ID	Cuenca	Código estación												
		1	27010770	26230180	2308024	2701034	2701035	2701037	2701038	2701045	2701046	2701047	2701093	2701115	Suma
52	Q. La Arenera	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	35,92	0,00	0,00	64,08	100
53	Q. La García	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100
54	Q. La Zorrita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100
55	Q. La Potrera	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100
56	Q. La Mauala	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100
57	Q. La Manguala	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100
58	Q. La Rafita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100
59	Q. La Candela	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100
60	Q. El Rosario	0,00	0,00	0,00	5,61	94,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

8.4.4 Magnitud de la tormenta

Para estimar la magnitud de la tormenta de diseño (intensidad o profundidad) se utilizó la información de las estaciones con información de precipitación en el área de interés. Para las estaciones operadas por EPM, las cuales cuentan con información de curvas IDF, los valores se determinaron según lo descrito anteriormente. Mientras que, para las estaciones operadas por el IDEAM, las cuales no cuentan con información de curvas IDF, se realizó su reconstrucción con base en la metodología de regionalización propuesta por Wilches (2001).

- **Estaciones operadas por EPM**

Para cada una de las estaciones operadas por EPM, se cuenta con estimaciones de curvas IDF desde el año 2005, con actualizaciones para los años 2021 y 2025. Asimismo, algunas de estas cuentan con un análisis de escenarios de cambio climático, según un estudio de la Universidad Nacional de Colombia (2017).

De esta forma, para cada estación analizada se tienen entre tres (3) y cinco (5) estimaciones de intensidad de lluvia para diferentes periodos de retorno.

- Escenario 1: Revista hidrometeorológica EPM del año 2005.
- Escenario 2: Revista hidrometeorológica EPM del año 2021.
- Escenario 3: Ultima actualización interna EPM del año 2025.
- Escenario 4: Actualización UNAL en el año 2017 con información de EPM para esa fecha.
- Escenario 5: Propuesta de escenario de cambio climático realizada por UNAL en el año 2017 con información de EPM para esa fecha.

Para establecer los valores de intensidad empleados en la actualización de los estudios básicos de amenaza, se realizó un análisis comparativo de las curvas para un periodo de retorno de TR 100 años. En la Ilustración 146 a la Ilustración 149 se muestra la comparación para diferentes estaciones, observando que no se presenta un comportamiento consistente ya que para tiempos de concentración inferiores a 10 min los valores de intensidad de lluvia son inferiores con la estimación de cambio climático, con excepción de las estaciones San Antonio de Prado, San Cristóbal, Chorrillos. Así mismo para tiempos de concentración superiores a 10 minutos los valores de intensidad de lluvia son mayores para la estimación de cambio climático, con excepción de la estación Ayurá. Finalmente, para las estaciones Medellín y Astilleros las estimaciones del año 2021 son significativamente superiores para duraciones inferiores a 35 y 15 minutos respectivamente; para valores de duración superiores son similares.

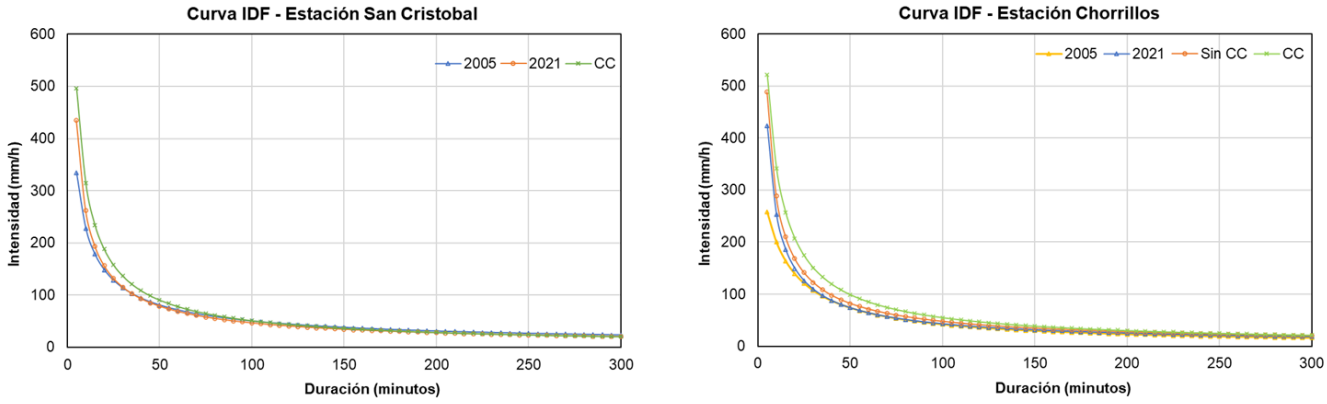


Ilustración 146. Comparación de diferentes estimaciones para las curvas IDF - T_R 100 años

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

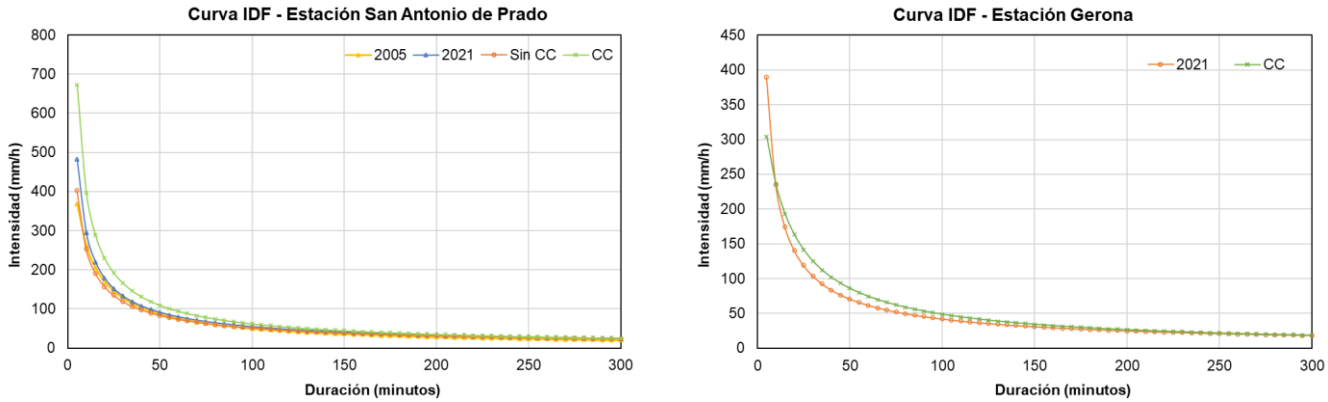


Ilustración 147. Comparación de diferentes estimaciones para las curvas IDF - T_R 100 años

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

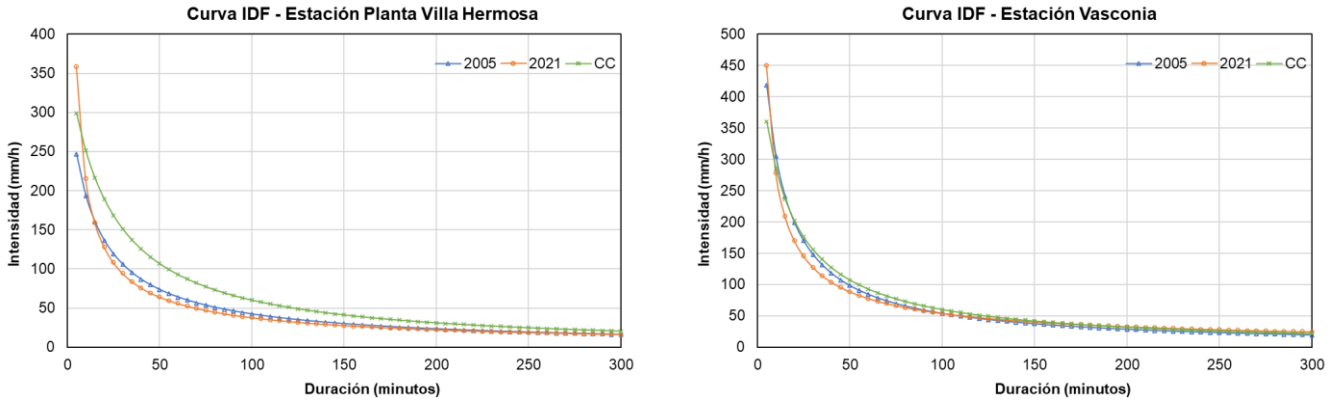


Ilustración 148. Comparación de diferentes estimaciones para las curvas IDF - T_R 100 años

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

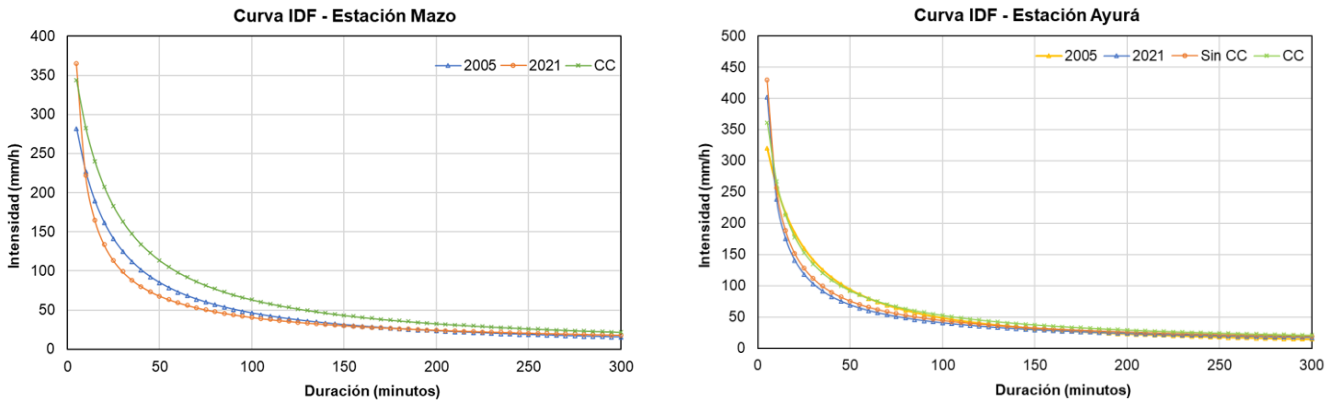


Ilustración 149. Comparación de diferentes estimaciones para las curvas IDF - T_R 100 años

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Dado que no se observa un patrón consistente en las estimaciones para todas las estaciones, se decidió generar una envolvente para las curvas IDF de tal forma que se tomen, para todas las duraciones, la intensidad más alta entre todos los valores existentes. De la Ilustración 150 a Ilustración 155 se presentan las curvas IDF obtenidas para las estaciones con influencia en las cuencas priorizadas.

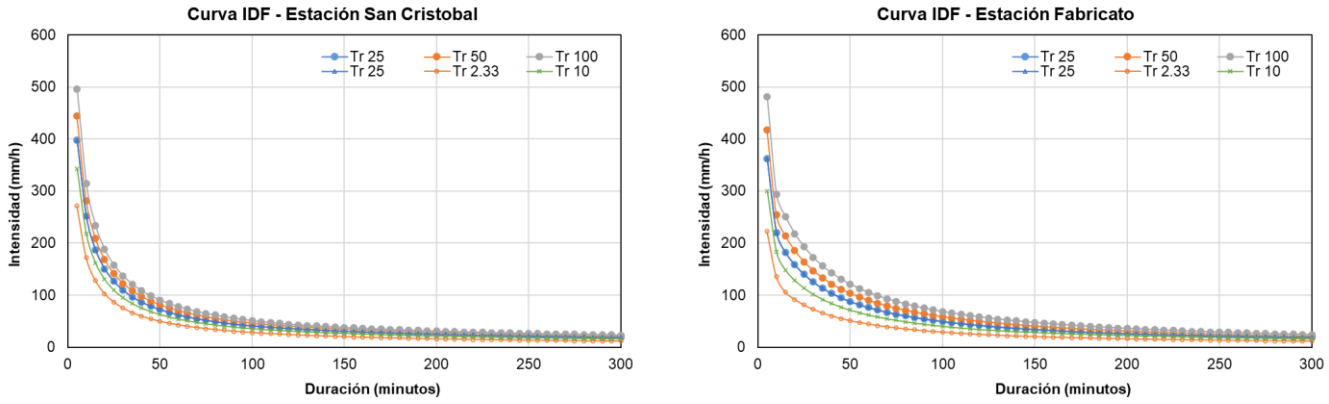


Ilustración 150. Curvas IDF para las estaciones San Cristóbal y Fabricato

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

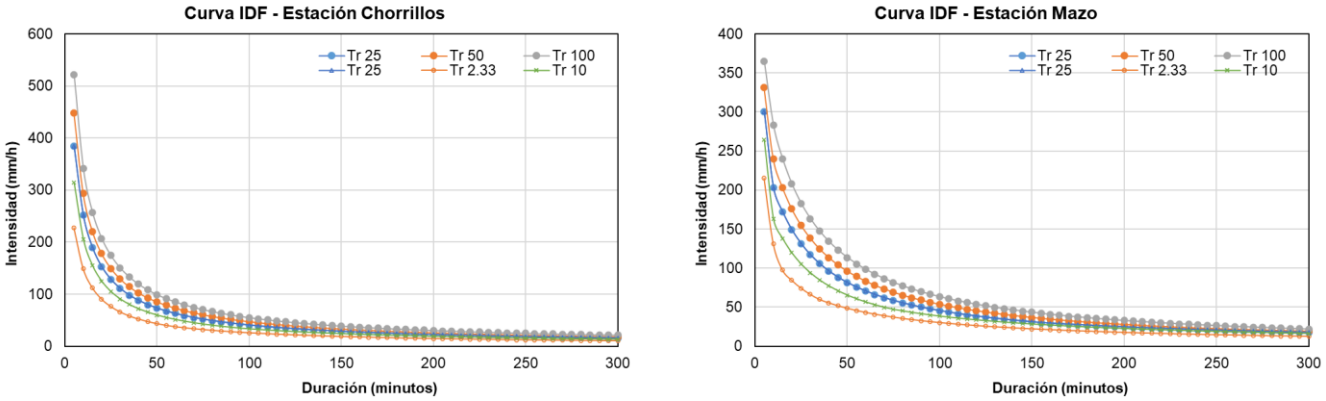


Ilustración 151. Curvas IDF para las estaciones Chorrillos y Mazo

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

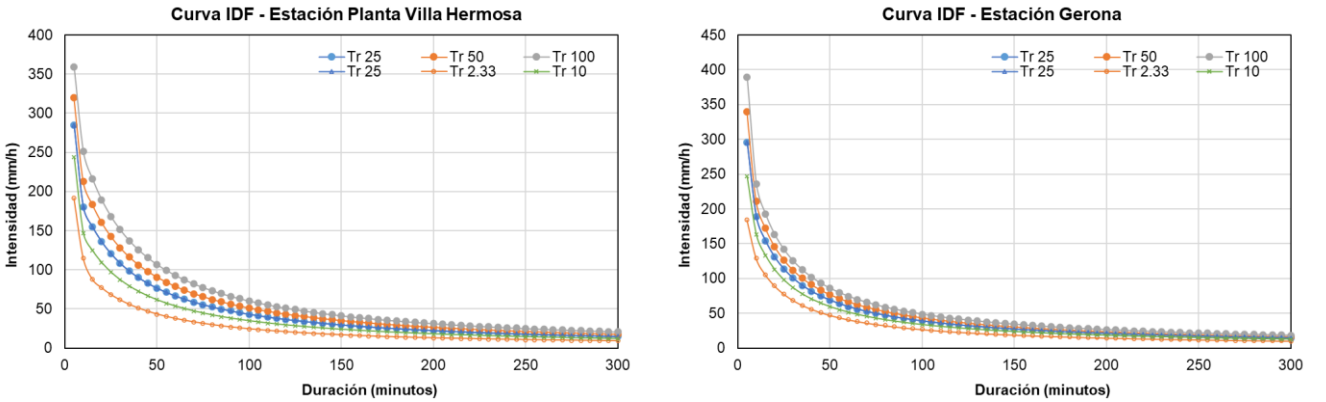


Ilustración 152. Curvas IDF para las estaciones Villa Hermosa y Gerona

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

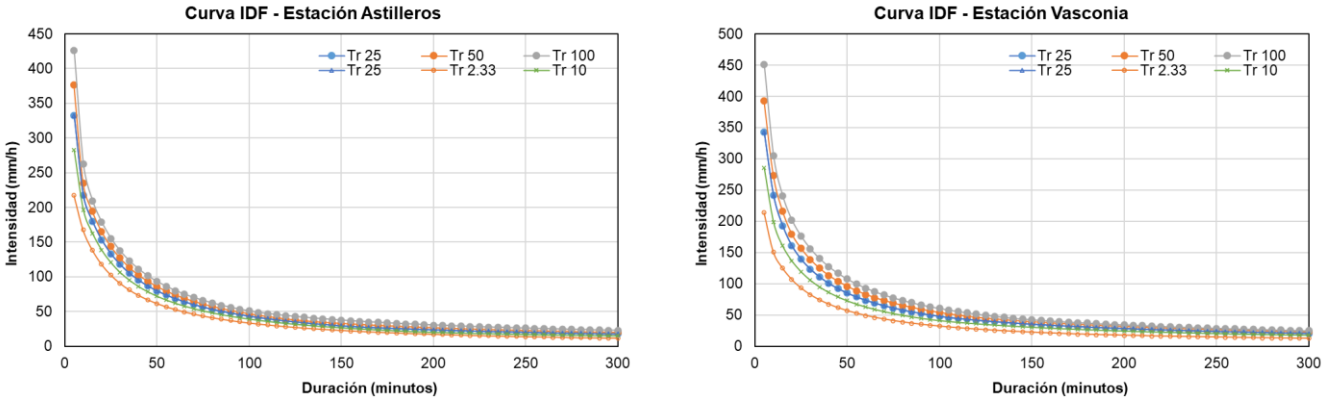


Ilustración 153. Curvas IDF para las estaciones Astillero y Vasconia

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

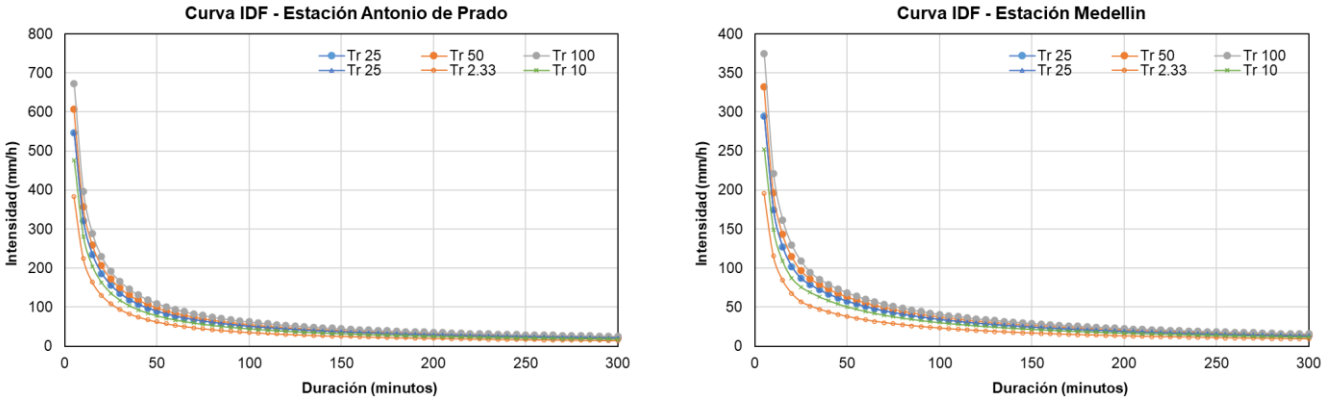


Ilustración 154. Curvas IDF para las estaciones San Antonio de Prado y Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

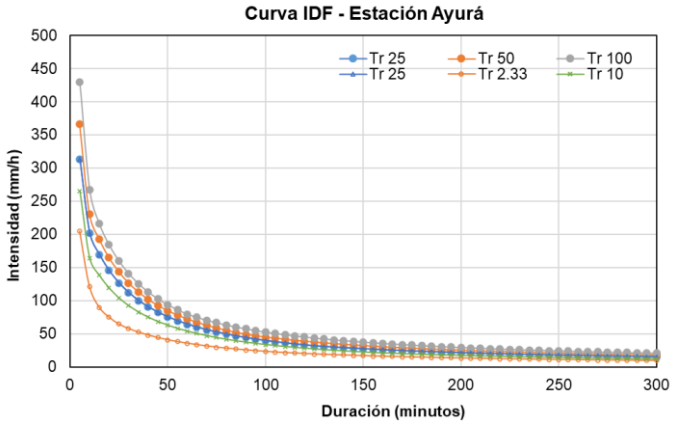


Ilustración 155. Curvas IDF para la estación Ayurá

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

En conclusión, para cada una de las cuencas analizada se estimaron las precipitaciones de diseño para cada uno de estos escenarios, seleccionando siempre el mayor valor obtenido.

Análisis de regresión

Con el fin de parametrizar las curvas IDF y mejorar la posibilidad de automatizar el cálculo de caudales máximos, se realizó un análisis de regresión de cada para cada estación y para cada periodo de retorno.

En la literatura existen diversas fórmulas para realizar el ajuste de las curvas a los datos observados. Y es normal que ciertas estaciones en diferentes periodos de tiempo exhiban un cambio de comportamiento. Así, se encontró que, para las estaciones con influencia en el Distrito de Medellín, presentan estaciones con ajustes y formulaciones diferentes. Algunas de las cuales no se correlacionaron con el período de retorno, por lo que solo cuentan con parámetros de calibración

hasta 100 años. Se encontraron tres tipos de ecuaciones de cuatro comúnmente utilizados en climatología:

$$I_D = \frac{(K + T_R)^m}{(C + D)^n}$$ **Ecuación Tipo I**

$$I_D = \frac{(K + T_R)^m}{(C + D)^n}$$ **Ecuación Tipo II**

$$I_D = \frac{K}{(C + D)^n}$$ **Ecuación Tipo III**

$$I_D = \frac{K}{(C + D/60)^n}$$ **Ecuación Tipo IV**

donde,

I_D es la intensidad de la lluvia, en mm
K es la constante en el numerador
m es el exponente del numerador
C es la constante en el denominador
n es el exponente del denominador
T_R es el período de retorno en años
D es la duración en minutos

Para algunos escenarios las variables de ajuste del

Las ecuaciones se generalizaron para ajustarlas a las ecuaciones tipo I, III y IV. En la Tabla 36 se presentan los parámetros obtenidos.

Tabla 36. Parametrización de curvas IDF para diferentes periodos de retorno

Código	Nombre	Escenario	T_R	Tipo ecuación	K	C	N	M
1	Gerona	2	2	1	546,77	0,25	0,76	0,20
1	Gerona	2	5	1	546,77	0,25	0,76	0,20
1	Gerona	2	10	1	546,77	0,25	0,76	0,20
1	Gerona	2	25	1	546,77	0,25	0,76	0,20
1	Gerona	2	50	1	546,77	0,25	0,76	0,20
1	Gerona	2	100	1	546,77	0,25	0,76	0,20
1	Gerona	2	200	1	546,77	0,25	0,76	0,20
1	Gerona	2	500	1	546,77	0,25	0,76	0,20
1	Gerona	3	2	1	546,77	0,25	0,76	0,20
1	Gerona	3	5	1	546,77	0,25	0,76	0,20
1	Gerona	3	10	1	546,77	0,25	0,76	0,20

Código	Nombre	Escenario	T_R	Tipo ecuación	K	C	N	M
1	Gerona	3	25	1	546,77	0,25	0,76	0,20
1	Gerona	3	50	1	546,77	0,25	0,76	0,20
1	Gerona	3	100	1	546,77	0,25	0,76	0,20
1	Gerona	3	200	1	546,77	0,25	0,76	0,20
1	Gerona	3	500	1	546,77	0,25	0,76	0,20
1	Gerona	5	2	1	546,77	0,25	0,76	0,20
1	Gerona	5	5	1	546,77	0,25	0,76	0,20
1	Gerona	5	10	1	546,77	0,25	0,76	0,20
1	Gerona	5	25	1	546,77	0,25	0,76	0,20
1	Gerona	5	50	1	546,77	0,25	0,76	0,20
1	Gerona	5	100	1	546,77	0,25	0,76	0,20
1	Gerona	5	200	1	546,77	0,25	0,76	0,20
1	Gerona	5	500	1	546,77	0,25	0,76	0,20
2308024	Vasconia	1	2	3	3565,70	17,00	1,02	
2308024	Vasconia	1	5	3	3415,40	12,00	0,98	
2308024	Vasconia	1	10	3	3587,90	10,00	0,97	
2308024	Vasconia	1	25	3	4166,70	9,00	0,97	
2308024	Vasconia	1	50	3	4339,80	8,00	0,96	
2308024	Vasconia	1	100	3	4984,90	8,00	0,97	
2308024	Vasconia	1	200	3	5365,55	7,55	0,96	
2308024	Vasconia	1	500	3	5973,83	7,24	0,97	
2308024	Vasconia	2	2	1	596,37	0,25	0,72	0,20
2308024	Vasconia	2	5	1	596,37	0,25	0,72	0,20
2308024	Vasconia	2	10	1	596,37	0,25	0,72	0,20
2308024	Vasconia	2	25	1	596,37	0,25	0,72	0,20
2308024	Vasconia	2	50	1	596,37	0,25	0,72	0,20
2308024	Vasconia	2	100	1	596,37	0,25	0,72	0,20
2308024	Vasconia	2	200	1	596,37	0,25	0,72	0,20
2308024	Vasconia	2	500	1	596,37	0,25	0,72	0,20
2308024	Vasconia	3	2	4	57,51	0,40	0,91	
2308024	Vasconia	3	5	4	68,93	0,40	0,90	
2308024	Vasconia	3	10	4	78,22	0,40	0,89	
2308024	Vasconia	3	25	4	89,95	0,40	0,88	
2308024	Vasconia	3	50	4	98,65	0,40	0,87	
2308024	Vasconia	3	100	4	107,28	0,40	0,87	
2308024	Vasconia	3	200	4	116,35	0,40	0,87	
2308024	Vasconia	3	500	4	128,08	0,40	0,86	
2308024	Vasconia	5	2	1	3148,97	14,09	1,00	0,17
2308024	Vasconia	5	5	1	3148,97	14,09	1,00	0,17
2308024	Vasconia	5	10	1	3148,97	14,09	1,00	0,17

Código	Nombre	Escenario	T_R	Tipo ecuación	K	C	N	M
2308024	Vasconia	5	25	1	3148,97	14,09	1,00	0,17
2308024	Vasconia	5	50	1	3148,97	14,09	1,00	0,17
2308024	Vasconia	5	100	1	3148,97	14,09	1,00	0,17
2308024	Vasconia	5	200	1	3148,97	14,09	1,00	0,17
2308024	Vasconia	5	500	1	3148,97	14,09	1,00	0,17
2701034	Mazo	1	2	3	37203,00	60,00	1,44	
2701034	Mazo	1	5	3	11732,00	34,00	1,22	
2701034	Mazo	1	10	3	8937,90	26,00	1,15	
2701034	Mazo	1	25	3	8191,80	21,00	1,12	
2701034	Mazo	1	50	3	8366,30	19,00	1,11	
2701034	Mazo	1	100	3	9065,60	18,00	1,11	
2701034	Mazo	1	200	3	9850,29	17,19	1,11	
2701034	Mazo	1	500	3	10904,89	16,41	1,11	
2701034	Mazo	2	2	1	657,74	0,25	0,74	0,14
2701034	Mazo	2	5	1	657,74	0,25	0,74	0,14
2701034	Mazo	2	10	1	657,74	0,25	0,74	0,14
2701034	Mazo	2	25	1	657,74	0,25	0,74	0,14
2701034	Mazo	2	50	1	657,74	0,25	0,74	0,14
2701034	Mazo	2	100	1	657,74	0,25	0,74	0,14
2701034	Mazo	2	200	1	657,74	0,25	0,74	0,14
2701034	Mazo	2	500	1	657,74	0,25	0,74	0,14
2701034	Mazo	3	2	4	50,37	0,40	0,93	
2701034	Mazo	3	5	4	58,77	0,40	0,92	
2701034	Mazo	3	10	4	65,60	0,40	0,91	
2701034	Mazo	3	25	4	74,23	0,40	0,91	
2701034	Mazo	3	50	4	80,63	0,40	0,90	
2701034	Mazo	3	100	4	86,98	0,40	0,90	
2701034	Mazo	3	200	4	93,65	0,40	0,89	
2701034	Mazo	3	500	4	102,29	0,40	0,89	
2701034	Mazo	5	2	1	3890,95	20,54	1,09	0,24
2701034	Mazo	5	5	1	3890,95	20,54	1,09	0,24
2701034	Mazo	5	10	1	3890,95	20,54	1,09	0,24
2701034	Mazo	5	25	1	3890,95	20,54	1,09	0,24
2701034	Mazo	5	50	1	3890,95	20,54	1,09	0,24
2701034	Mazo	5	100	1	3890,95	20,54	1,09	0,24
2701034	Mazo	5	200	1	3890,95	20,54	1,09	0,24
2701034	Mazo	5	500	1	3890,95	20,54	1,09	0,24
2701035	Chorrillos	1	2	3	6256,70	35,00	1,15	
2701035	Chorrillos	1	5	3	3527,60	21,00	1,02	
2701035	Chorrillos	1	10	3	2779,10	15,00	0,95	

Código	Nombre	Escenario	T_R	Tipo ecuación	K	C	N	M
2701035	Chorrillos	1	25	3	3063,30	13,00	0,94	
2701035	Chorrillos	1	50	3	3297,30	12,00	0,94	
2701035	Chorrillos	1	100	3	3448,00	11,00	0,94	
2701035	Chorrillos	1	200	3	3709,40	10,39	0,93	
2701035	Chorrillos	1	500	3	4063,79	9,81	0,93	
2701035	Chorrillos	2	2	1	674,66	0,25	0,77	0,18
2701035	Chorrillos	2	5	1	674,66	0,25	0,77	0,18
2701035	Chorrillos	2	10	1	674,66	0,25	0,77	0,18
2701035	Chorrillos	2	25	1	674,66	0,25	0,77	0,18
2701035	Chorrillos	2	50	1	674,66	0,25	0,77	0,18
2701035	Chorrillos	2	100	1	674,66	0,25	0,77	0,18
2701035	Chorrillos	2	200	1	674,66	0,25	0,77	0,18
2701035	Chorrillos	2	500	1	674,66	0,25	0,77	0,18
2701035	Chorrillos	3	2	4	51,45	0,40	0,95	
2701035	Chorrillos	3	5	4	59,81	0,40	0,96	
2701035	Chorrillos	3	10	4	66,62	0,40	0,96	
2701035	Chorrillos	3	25	4	75,23	0,40	0,96	
2701035	Chorrillos	3	50	4	81,62	0,40	0,96	
2701035	Chorrillos	3	100	4	87,96	0,40	0,96	
2701035	Chorrillos	3	200	4	94,58	0,40	0,96	
2701035	Chorrillos	3	500	4	103,17	0,40	0,97	
2701035	Chorrillos	4	2	1	628,39	0,25	0,79	0,23
2701035	Chorrillos	4	5	1	628,39	0,25	0,79	0,23
2701035	Chorrillos	4	10	1	628,39	0,25	0,79	0,23
2701035	Chorrillos	4	25	1	628,39	0,25	0,79	0,23
2701035	Chorrillos	4	50	1	628,39	0,25	0,79	0,23
2701035	Chorrillos	4	100	1	628,39	0,25	0,79	0,23
2701035	Chorrillos	4	200	1	628,39	0,25	0,79	0,23
2701035	Chorrillos	4	500	1	628,39	0,25	0,79	0,23
2701035	Chorrillos	5	2	1	1236,58	3,24	0,89	0,22
2701035	Chorrillos	5	5	1	1236,58	3,24	0,89	0,22
2701035	Chorrillos	5	10	1	1236,58	3,24	0,89	0,22
2701035	Chorrillos	5	25	1	1236,58	3,24	0,89	0,22
2701035	Chorrillos	5	50	1	1236,58	3,24	0,89	0,22
2701035	Chorrillos	5	100	1	1236,58	3,24	0,89	0,22
2701035	Chorrillos	5	200	1	1236,58	3,24	0,89	0,22
2701035	Chorrillos	5	500	1	1236,58	3,24	0,89	0,22
2701037	Fabricato	1	2	3	1751,80	21,00	0,89	
2701037	Fabricato	1	5	3	1804,00	15,00	0,86	
2701037	Fabricato	1	10	3	2023,30	13,00	0,85	

Código	Nombre	Escenario	T_R	Tipo ecuación	K	C	N	M
2701037	Fabricato	1	25	3	2224,50	11,00	0,84	
2701037	Fabricato	1	50	3	2388,40	10,00	0,83	
2701037	Fabricato	1	100	3	2757,40	10,00	0,84	
2701037	Fabricato	1	200	3	2978,44	9,46	0,84	
2701037	Fabricato	1	500	3	3328,65	9,09	0,84	
2701037	Fabricato	2	2	1	641,97	0,25	0,74	0,20
2701037	Fabricato	2	5	1	641,97	0,25	0,74	0,20
2701037	Fabricato	2	10	1	641,97	0,25	0,74	0,20
2701037	Fabricato	2	25	1	641,97	0,25	0,74	0,20
2701037	Fabricato	2	50	1	641,97	0,25	0,74	0,20
2701037	Fabricato	2	100	1	641,97	0,25	0,74	0,20
2701037	Fabricato	2	200	1	641,97	0,25	0,74	0,20
2701037	Fabricato	2	500	1	641,97	0,25	0,74	0,20
2701037	Fabricato	3	2	4	53,58	0,40	0,92	
2701037	Fabricato	3	5	4	65,53	0,40	0,91	
2701037	Fabricato	3	10	4	75,23	0,40	0,91	
2701037	Fabricato	3	25	4	87,49	0,40	0,91	
2701037	Fabricato	3	50	4	96,57	0,40	0,91	
2701037	Fabricato	3	100	4	105,57	0,40	0,90	
2701037	Fabricato	3	200	4	115,02	0,40	0,90	
2701037	Fabricato	3	500	4	127,24	0,40	0,90	
2701037	Fabricato	5	2	1	4010,43	20,94	1,07	0,23
2701037	Fabricato	5	5	1	4010,43	20,94	1,07	0,23
2701037	Fabricato	5	10	1	4010,43	20,94	1,07	0,23
2701037	Fabricato	5	25	1	4010,43	20,94	1,07	0,23
2701037	Fabricato	5	50	1	4010,43	20,94	1,07	0,23
2701037	Fabricato	5	100	1	4010,43	20,94	1,07	0,23
2701037	Fabricato	5	200	1	4010,43	20,94	1,07	0,23
2701037	Fabricato	5	500	1	4010,43	20,94	1,07	0,23
2701038	San Antonio	1	2	3	6885,00	29,00	1,14	
2701038	San Antonio	1	5	3	2978,70	14,00	0,95	
2701038	San Antonio	1	10	3	2614,10	10,00	0,91	
2701038	San Antonio	1	25	3	2445,70	7,00	0,87	
2701038	San Antonio	1	50	3	2549,90	6,00	0,86	
2701038	San Antonio	1	100	3	2585,60	5,00	0,85	
2701038	San Antonio	1	200	3	2824,35	4,66	0,85	
2701038	San Antonio	1	500	3	3069,20	4,18	0,85	
2701038	San Antonio	2	2	1	669,64	0,25	0,74	0,19
2701038	San Antonio	2	5	1	669,64	0,25	0,74	0,19
2701038	San Antonio	2	10	1	669,64	0,25	0,74	0,19

Código	Nombre	Escenario	T_R	Tipo ecuación	K	C	N	M
2701038	San Antonio	2	25	1	669,64	0,25	0,74	0,19
2701038	San Antonio	2	50	1	669,64	0,25	0,74	0,19
2701038	San Antonio	2	100	1	669,64	0,25	0,74	0,19
2701038	San Antonio	2	200	1	669,64	0,25	0,74	0,19
2701038	San Antonio	2	500	1	669,64	0,25	0,74	0,19
2701038	San Antonio	3	2	4	54,09	0,40	0,90	
2701038	San Antonio	3	5	4	63,32	0,40	0,89	
2701038	San Antonio	3	10	4	70,83	0,40	0,89	
2701038	San Antonio	3	25	4	80,32	0,40	0,89	
2701038	San Antonio	3	50	4	87,35	0,40	0,88	
2701038	San Antonio	3	100	4	94,32	0,40	0,88	
2701038	San Antonio	3	200	4	101,63	0,40	0,88	
2701038	San Antonio	3	500	4	111,10	0,40	0,88	
2701038	San Antonio	4	2	1	644,40	0,25	0,70	0,15
2701038	San Antonio	4	5	1	644,40	0,25	0,70	0,15
2701038	San Antonio	4	10	1	644,40	0,25	0,70	0,15
2701038	San Antonio	4	25	1	644,40	0,25	0,70	0,15
2701038	San Antonio	4	50	1	644,40	0,25	0,70	0,15
2701038	San Antonio	4	100	1	644,40	0,25	0,70	0,15
2701038	San Antonio	4	200	1	644,40	0,25	0,70	0,15
2701038	San Antonio	4	500	1	644,40	0,25	0,70	0,15
2701038	San Antonio	5	2	1	1367,53	0,51	0,82	0,15
2701038	San Antonio	5	5	1	1367,53	0,51	0,82	0,15
2701038	San Antonio	5	10	1	1367,53	0,51	0,82	0,15
2701038	San Antonio	5	25	1	1367,53	0,51	0,82	0,15
2701038	San Antonio	5	50	1	1367,53	0,51	0,82	0,15
2701038	San Antonio	5	100	1	1367,53	0,51	0,82	0,15
2701038	San Antonio	5	200	1	1367,53	0,51	0,82	0,15
2701038	San Antonio	5	500	1	1367,53	0,51	0,82	0,15
2701045	Villahermosa	1	2	3	4722,30	24,00	1,11	
2701045	Villahermosa	1	5	3	3898,90	19,00	1,04	
2701045	Villahermosa	1	10	3	3483,10	16,00	0,99	
2701045	Villahermosa	1	25	3	3433,20	14,00	0,97	
2701045	Villahermosa	1	50	3	3487,60	13,00	0,95	
2701045	Villahermosa	1	100	3	3491,60	12,00	0,94	
2701045	Villahermosa	1	200	3	3646,27	11,46	0,93	
2701045	Villahermosa	1	500	3	3818,91	10,81	0,92	
2701045	Villahermosa	2	2	1	588,93	0,25	0,76	0,17
2701045	Villahermosa	2	5	1	588,93	0,25	0,76	0,17
2701045	Villahermosa	2	10	1	588,93	0,25	0,76	0,17

Código	Nombre	Escenario	T_R	Tipo ecuación	K	C	N	M
2701045	Villahermosa	2	25	1	588,93	0,25	0,76	0,17
2701045	Villahermosa	2	50	1	588,93	0,25	0,76	0,17
2701045	Villahermosa	2	100	1	588,93	0,25	0,76	0,17
2701045	Villahermosa	2	200	1	588,93	0,25	0,76	0,17
2701045	Villahermosa	2	500	1	588,93	0,25	0,76	0,17
2701045	Villahermosa	3	2	4	44,71	0,40	0,94	
2701045	Villahermosa	3	5	4	51,39	0,40	0,95	
2701045	Villahermosa	3	10	4	56,83	0,40	0,95	
2701045	Villahermosa	3	25	4	63,68	0,40	0,95	
2701045	Villahermosa	3	50	4	68,77	0,40	0,95	
2701045	Villahermosa	3	100	4	73,80	0,40	0,96	
2701045	Villahermosa	3	200	4	79,09	0,40	0,96	
2701045	Villahermosa	3	500	4	85,94	0,40	0,96	
2701045	Villahermosa	5	2	1	4449,47	24,92	1,12	0,24
2701045	Villahermosa	5	5	1	4449,47	24,92	1,12	0,24
2701045	Villahermosa	5	10	1	4449,47	24,92	1,12	0,24
2701045	Villahermosa	5	25	1	4449,47	24,92	1,12	0,24
2701045	Villahermosa	5	50	1	4449,47	24,92	1,12	0,24
2701045	Villahermosa	5	100	1	4449,47	24,92	1,12	0,24
2701045	Villahermosa	5	200	1	4449,47	24,92	1,12	0,24
2701045	Villahermosa	5	500	1	4449,47	24,92	1,12	0,24
2701046	San Cristóbal	1	2	3	2593,60	25,00	0,96	
2701046	San Cristóbal	1	5	3	1307,80	10,00	0,80	
2701046	San Cristóbal	1	10	3	1180,00	6,00	0,75	
2701046	San Cristóbal	1	25	3	1249,00	4,00	0,73	
2701046	San Cristóbal	1	50	3	1308,10	3,00	0,72	
2701046	San Cristóbal	1	100	3	1326,90	2,00	0,71	
2701046	San Cristóbal	1	200	3	1492,05	1,90	0,72	
2701046	San Cristóbal	1	500	3	1646,58	1,54	0,72	
2701046	San Cristóbal	2	2	1	683,51	0,25	0,76	0,17
2701046	San Cristóbal	2	5	1	683,51	0,25	0,76	0,17
2701046	San Cristóbal	2	10	1	683,51	0,25	0,76	0,17
2701046	San Cristóbal	2	25	1	683,51	0,25	0,76	0,17
2701046	San Cristóbal	2	50	1	683,51	0,25	0,76	0,17
2701046	San Cristóbal	2	100	1	683,51	0,25	0,76	0,17
2701046	San Cristóbal	2	200	1	683,51	0,25	0,76	0,17
2701046	San Cristóbal	2	500	1	683,51	0,25	0,76	0,17
2701046	San Cristóbal	3	2	4	53,81	0,40	0,93	
2701046	San Cristóbal	3	5	4	62,61	0,40	0,94	
2701046	San Cristóbal	3	10	4	69,77	0,40	0,95	

Código	Nombre	Escenario	T_R	Tipo ecuación	K	C	N	M
2701046	San Cristóbal	3	25	4	78,80	0,40	0,96	
2701046	San Cristóbal	3	50	4	85,49	0,40	0,96	
2701046	San Cristóbal	3	100	4	92,13	0,40	0,96	
2701046	San Cristóbal	3	200	4	99,12	0,40	0,97	
2701046	San Cristóbal	3	500	4	108,15	0,40	0,97	
2701046	San Cristóbal	5	2	1	1246,13	2,03	0,85	0,16
2701046	San Cristóbal	5	5	1	1246,13	2,03	0,85	0,16
2701046	San Cristóbal	5	10	1	1246,13	2,03	0,85	0,16
2701046	San Cristóbal	5	25	1	1246,13	2,03	0,85	0,16
2701046	San Cristóbal	5	50	1	1246,13	2,03	0,85	0,16
2701046	San Cristóbal	5	100	1	1246,13	2,03	0,85	0,16
2701046	San Cristóbal	5	200	1	1246,13	2,03	0,85	0,16
2701046	San Cristóbal	5	500	1	1246,13	2,03	0,85	0,16
2701047	Medellín	2	2	1	624,46	0,25	0,79	0,17
2701047	Medellín	2	5	1	624,46	0,25	0,79	0,17
2701047	Medellín	2	10	1	624,46	0,25	0,79	0,17
2701047	Medellín	2	25	1	624,46	0,25	0,79	0,17
2701047	Medellín	2	50	1	624,46	0,25	0,79	0,17
2701047	Medellín	2	100	1	624,46	0,25	0,79	0,17
2701047	Medellín	2	200	1	624,46	0,25	0,79	0,17
2701047	Medellín	2	500	1	624,46	0,25	0,79	0,17
2701047	Medellín	3	2	4	46,49	0,40	0,96	
2701047	Medellín	3	5	4	55,16	0,40	0,98	
2701047	Medellín	3	10	4	62,22	0,40	0,98	
2701047	Medellín	3	25	4	71,13	0,40	0,99	
2701047	Medellín	3	50	4	77,73	0,40	1,00	
2701047	Medellín	3	100	4	84,28	0,40	1,00	
2701047	Medellín	3	200	4	91,17	0,40	1,00	
2701047	Medellín	3	500	4	100,07	0,40	1,01	
2701047	Medellín	5	2	1	2048,13	18,79	1,06	0,22
2701047	Medellín	5	5	1	2048,13	18,79	1,06	0,22
2701047	Medellín	5	10	1	2048,13	18,79	1,06	0,22
2701047	Medellín	5	25	1	2048,13	18,79	1,06	0,22
2701047	Medellín	5	50	1	2048,13	18,79	1,06	0,22
2701047	Medellín	5	100	1	2048,13	18,79	1,06	0,22
2701047	Medellín	5	200	1	2048,13	18,79	1,06	0,22
2701047	Medellín	5	500	1	2048,13	18,79	1,06	0,22
2701093	Ayurá	1	2	3	4238,20	23,00	1,08	
2701093	Ayurá	1	5	3	6992,00	22,00	1,14	
2701093	Ayurá	1	10	3	9852,60	22,00	1,18	

Código	Nombre	Escenario	T_R	Tipo ecuación	K	C	N	M
2701093	Ayurá	1	25	3	13745,00	22,00	1,22	
2701093	Ayurá	1	50	3	16776,00	22,00	1,24	
2701093	Ayurá	1	100	3	19876,00	22,00	1,25	
2701093	Ayurá	1	200	3	18892,72	20,58	1,22	
2701093	Ayurá	1	500	3	28192,79	22,20	1,28	
2701093	Ayurá	2	2	1	638,48	0,25	0,78	0,18
2701093	Ayurá	2	5	1	638,48	0,25	0,78	0,18
2701093	Ayurá	2	10	1	638,48	0,25	0,78	0,18
2701093	Ayurá	2	25	1	638,48	0,25	0,78	0,18
2701093	Ayurá	2	50	1	638,48	0,25	0,78	0,18
2701093	Ayurá	2	100	1	638,48	0,25	0,78	0,18
2701093	Ayurá	2	200	1	638,48	0,25	0,78	0,18
2701093	Ayurá	2	500	1	638,48	0,25	0,78	0,18
2701093	Ayurá	3	2	4	45,29	0,40	0,94	
2701093	Ayurá	3	5	4	54,84	0,40	0,96	
2701093	Ayurá	3	10	4	62,63	0,40	0,98	
2701093	Ayurá	3	25	4	72,47	0,40	0,99	
2701093	Ayurá	3	50	4	79,78	0,40	1,00	
2701093	Ayurá	3	100	4	87,03	0,40	1,01	
2701093	Ayurá	3	200	4	94,68	0,40	1,01	
2701093	Ayurá	3	500	4	104,57	0,40	1,02	
2701093	Ayurá	4	2	1	534,03	0,25	0,77	0,23
2701093	Ayurá	4	5	1	534,03	0,25	0,77	0,23
2701093	Ayurá	4	10	1	534,03	0,25	0,77	0,23
2701093	Ayurá	4	25	1	534,03	0,25	0,77	0,23
2701093	Ayurá	4	50	1	534,03	0,25	0,77	0,23
2701093	Ayurá	4	100	1	534,03	0,25	0,77	0,23
2701093	Ayurá	4	200	1	534,03	0,25	0,77	0,23
2701093	Ayurá	4	500	1	534,03	0,25	0,77	0,23
2701093	Ayurá	5	2	1	1167,79	7,27	0,89	0,23
2701093	Ayurá	5	5	1	1167,79	7,27	0,89	0,23
2701093	Ayurá	5	10	1	1167,79	7,27	0,89	0,23
2701093	Ayurá	5	25	1	1167,79	7,27	0,89	0,23
2701093	Ayurá	5	50	1	1167,79	7,27	0,89	0,23
2701093	Ayurá	5	100	1	1167,79	7,27	0,89	0,23
2701093	Ayurá	5	200	1	1167,79	7,27	0,89	0,23
2701093	Ayurá	5	500	1	1167,79	7,27	0,89	0,23
2701115	Astilleros	2	2	1	623,86	0,25	0,73	0,18
2701115	Astilleros	2	5	1	623,86	0,25	0,73	0,18
2701115	Astilleros	2	10	1	623,86	0,25	0,73	0,18

Código	Nombre	Escenario	T_R	Tipo ecuación	K	C	N	M
2701115	Astilleros	2	25	1	623,86	0,25	0,73	0,18
2701115	Astilleros	2	50	1	623,86	0,25	0,73	0,18
2701115	Astilleros	2	100	1	623,86	0,25	0,73	0,18
2701115	Astilleros	2	200	1	623,86	0,25	0,73	0,18
2701115	Astilleros	2	500	1	623,86	0,25	0,73	0,18
2701115	Astilleros	3	2	4	53,81	0,40	0,93	
2701115	Astilleros	3	5	4	62,61	0,40	0,94	
2701115	Astilleros	3	10	4	69,77	0,40	0,95	
2701115	Astilleros	3	25	4	78,80	0,40	0,96	
2701115	Astilleros	3	50	4	85,49	0,40	0,96	
2701115	Astilleros	3	100	4	92,13	0,40	0,96	
2701115	Astilleros	3	200	4	99,12	0,40	0,97	
2701115	Astilleros	3	500	4	108,15	0,40	0,97	
2701115	Astilleros	5	2	1	5186,14	16,18	1,08	0,11
2701115	Astilleros	5	5	1	5186,14	16,18	1,08	0,11
2701115	Astilleros	5	10	1	5186,14	16,18	1,08	0,11
2701115	Astilleros	5	25	1	5186,14	16,18	1,08	0,11
2701115	Astilleros	5	50	1	5186,14	16,18	1,08	0,11
2701115	Astilleros	5	100	1	5186,14	16,18	1,08	0,11
2701115	Astilleros	5	200	1	5186,14	16,18	1,08	0,11
2701115	Astilleros	5	500	1	5186,14	16,18	1,08	0,11

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Como se observa en la tabla anterior, para ecuaciones con los mismos parámetros en todos los periodos de tiempo, están asociadas a ecuaciones de Tipo I donde es posible estimar curva de intensidad para cualquier período de retorno. En otros casos, los parámetros varían para cada período de retorno y no cuentan con parámetros para períodos de retorno de 200 o 500 años, utilizados normalmente en estudios de amenaza. De esta manera, para cada una de las estaciones se reconstruyeron las curvas (extrapolaron) mediante el siguiente procedimiento:

- Se seleccionaron varias duraciones de tiempo entre 5 y 1440 minutos (24 horas)
- Para cada duración se realizó regresión logarítmica y potencial, mediante mínimos cuadrados
- Con base en los parámetros de regresión se extrapolaron las curvas de intensidad 200 y 500 años de período de retorno.
- Con base en una función objetivo y un método numérico para minimiza el error, se estimaron los parámetros que mejor se ajustaban (menor error).

Los valores extrapolados se encuentran marcados en color verde en la tabla.

En la Ilustración 156 e Ilustración 157 se ilustra el ejemplo de ajuste en las estaciones Fabricato y San Cristóbal para una las funciones logarítmica y potencial, encontrando que en todos los casos la logarítmica representa el mejor ajuste. Por lo que fue la relación empleada en el presente estudio.

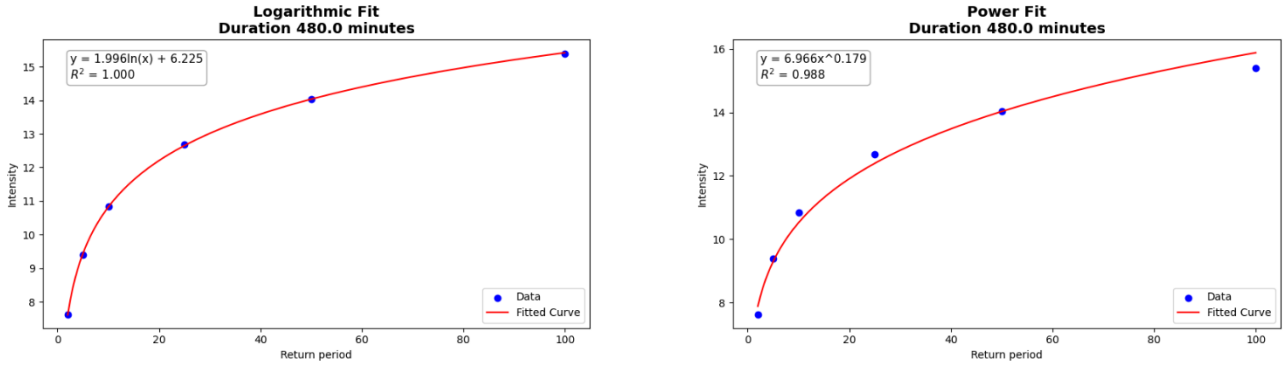


Ilustración 156. Ajuste logarítmico y potencial para un evento de duración de 480 minutos en la estación 2701037 (Fabricato) en el Escenario IDF 3

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

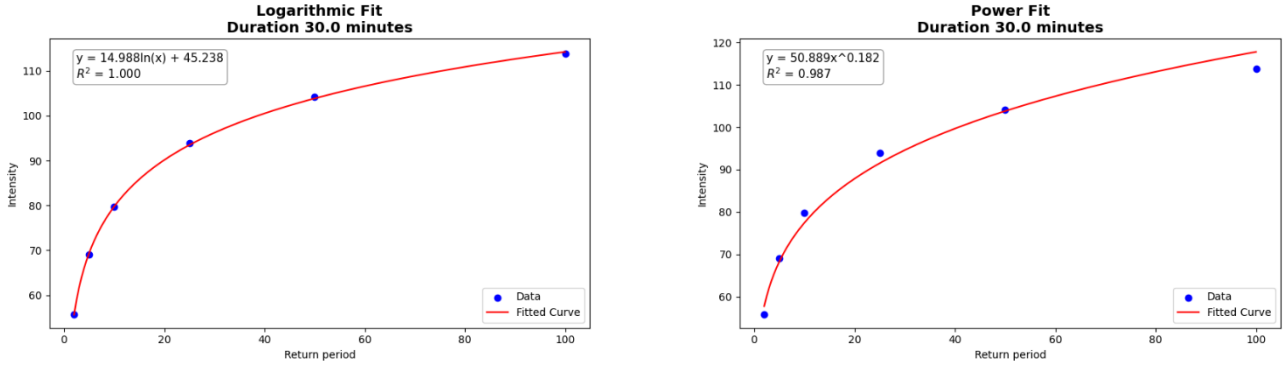


Ilustración 157. Ajuste logarítmico y potencial para un evento de duración de 30 minutos en la estación 2701046 (San Cristóbal) – En el Escenario IDF 1

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

- **Estaciones operadas por IDEAM**

Dado que para las estaciones operadas por el IDEAM no se cuenta con información de curvas IDF, es necesario estimarlas a partir de métodos de regionalización. Tal como se describió en la metodología, con base en los registros anuales de precipitación máxima en 24 horas, es posible, mediante la aplicación de la teoría de escalamiento propuesta por Wilches (2001), estimar las curvas IDF en estas estaciones (Ilustración 158).

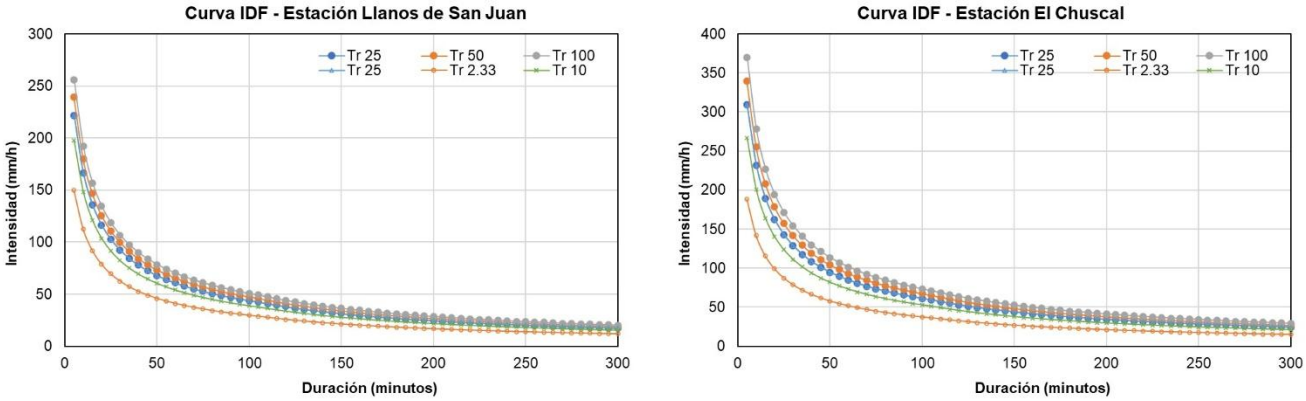


Ilustración 158. Curvas IDF para las estaciones Llanos de San Juan y El Chuscal

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

8.4.5 Intensidad y magnitud

Con base en los tiempos de concentración estimados y su respectiva distribución espacial se estimaron los valores de intensidad y ~~profundidad de la lluvia~~ precipitación de diseño para las cuencas priorizadas. Los resultados se presentan en la Tabla 37 y Tabla 38, respectivamente.

Tabla 37. Valores de intensidad de lluvia (mm/hora) para diferentes periodos de retorno

ID	Cuenca	TR 2,33	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100	TR 200	TR 500
1	Q. Santa Elena	20,5	24,7	28,4	34,0	38,7	44,1	50,8	61,2
2	Q. La Picacha	26,2	30,3	33,9	39,1	43,1	47,5	52,5	60,7
3	Q. La Iguaná	19,0	21,8	25,1	29,2	32,4	35,6	38,8	44,3
4	Q. Doña María	21,7	24,6	27,0	30,7	34,4	38,4	42,9	49,7
5	Q. La Presidenta	30,8	38,1	44,3	53,0	60,1	67,9	78,7	95,6
6	Q. La Poblada	25,2	30,7	35,5	42,4	48,2	55,2	63,8	77,2
7	Q. Ana Diaz	28,7	33,2	37,1	42,7	47,5	52,8	58,7	68,1
8	Q. La Hondita	104,4	121,7	140,1	174,5	206,1	243,4	287,5	358,2
9	Q. La Hueso	22,5	26,0	29,3	33,9	37,4	40,9	45,1	52,0
10	Q. Potreritos	43,5	49,6	54,8	62,5	69,1	76,4	84,5	97,1
11	Q. La Volcana	65,6	88,2	106,7	129,9	147,2	164,3	184,5	227,8
12	Q. La Seca	42,6	52,2	60,8	74,5	86,8	101,2	118,0	144,6
13	Q. La Lejía	51,8	60,2	67,4	78,4	87,8	98,4	110,2	128,2
14	Q. La Escopetería	56,9	75,3	90,4	109,6	123,9	138,3	155,1	191,2
15	Q. La Sucia	20,4	22,9	25,2	28,5	32,2	36,5	41,2	48,5
16	Q. La Frisola	34,6	38,9	42,4	47,7	52,1	56,9	62,7	73,4
17	Q. La Aguacatala	37,4	48,2	57,1	68,3	76,6	84,8	98,5	121,6
18	Q. La Puerta - Borbollona	58,0	67,2	75,1	86,9	97,1	108,5	121,3	140,4
19	Q. El Ñato	60,5	75,3	88,9	110,6	130,6	154,1	181,9	226,5
20	Q. La Astillera	46,0	50,9	55,0	60,8	65,6	70,8	76,4	87,5
21	Q. Altavista	22,7	26,5	29,7	34,4	38,5	43,0	48,0	55,8
22	Q. Zúñiga	56,5	75,0	90,2	109,4	123,5	137,6	154,1	190,3

ID	Cuenca	TR 2,33	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100	TR 200	TR 500
23	Q. El Hato - La Guayaba	79,5	92,0	102,8	119,1	133,0	148,6	166,1	192,3
24	Q. Canaveral - El Zancudo	65,1	81,0	95,5	118,7	140,0	165,1	194,7	242,1
25	Q. La Gómez	65,0	75,6	84,6	97,8	108,8	121,0	135,5	158,4
26	Q. La Guayabala	49,3	57,3	64,1	74,1	82,4	91,5	102,3	118,7
27	Q. El Ahorcado	57,9	72,1	85,2	106,1	125,2	147,8	174,5	217,4
28	Q. la Rafita - Chorro Hondo	60,2	75,0	88,5	110,3	130,2	153,7	181,5	226,0
29	Q. La Limona	64,0	73,4	81,5	93,5	103,7	115,1	127,7	146,5
30	Q. Piedra Gorda	36,0	43,8	51,1	62,6	73,2	85,5	99,9	122,8
31	Q. Piedras Blancas	19,7	23,3	26,5	32,6	38,2	44,9	52,8	65,4
32	Q. Miserenga	44,3	50,4	55,7	63,8	70,7	78,5	87,3	102,8
33	Q. Malpaso	39,7	46,6	52,3	60,1	66,2	72,5	79,4	95,0
34	Q. La Puerta	61,8	71,6	80,0	92,6	103,4	115,6	129,1	149,5
35	Q. La Pelahueso	58,0	67,2	75,1	86,9	97,1	108,5	121,3	140,4
36	Q. La Madera	48,2	57,4	65,5	77,6	88,2	100,1	113,9	137,1
37	Q. La Castro	42,3	52,6	62,1	77,3	91,2	107,6	127,0	158,1
38	Q. La Cantera Ramal Sur	68,9	80,4	90,4	105,4	118,5	133,1	149,6	174,6
39	Q. La Quintana	50,7	59,7	67,1	77,0	84,7	92,8	103,7	124,8
40	Q. La Chorrera - El Molino	40,8	50,8	59,9	74,6	88,0	103,8	122,5	152,6
41	Q. La Paulita	56,5	75,0	90,2	109,4	123,5	137,6	154,1	190,3
42	Q. La Moñonga	40,0	46,9	52,7	60,5	66,7	73,2	80,2	95,7
43	Q. La Bermejala	41,2	50,9	59,7	73,6	86,1	100,6	117,8	146,5
44	Q. La Leonarda	63,2	73,2	81,7	94,7	105,8	118,2	132,0	152,9
45	Q. La Guayaba	180,9	209,5	234,1	271,0	302,8	338,4	378,0	437,7
46	Q. La Larga	49,1	56,3	62,4	71,4	79,2	87,8	97,3	111,6
47	Q. Agua Fría	73,1	84,7	94,6	109,5	122,4	136,7	152,8	176,9
48	Q. La Despensa	92,0	105,6	117,1	134,4	149,1	165,5	183,6	210,6
49	Q. La Honda	47,1	58,7	69,3	86,4	102,0	120,5	142,3	177,3
50	Q. Minitas	103,7	114,7	123,7	136,9	147,7	159,4	172,0	190,3
51	Q. La Cañada	220,5	253,0	280,7	322,0	357,3	396,5	439,9	504,7
52	Q. La Arenera	97,8	109,7	119,8	134,6	147,1	160,7	175,7	197,7
53	Q. La García	84,5	97,8	109,3	126,5	141,4	157,9	176,5	204,3
54	Q. La Zorrita	191,1	219,3	243,3	279,2	309,8	343,7	381,4	437,6
55	Q. La Potrera	93,3	108,1	120,8	139,8	156,2	174,6	195,0	225,8
56	Q. La Mauala	113,9	130,7	145,0	166,4	184,7	204,9	227,3	260,8
57	Q. La Manguala	59,0	67,6	75,0	86,1	95,5	106,0	117,6	135,0
58	Q. La Rafita	80,1	99,8	117,8	146,8	173,4	204,7	241,8	301,3
59	Q. La Candela	94,6	108,5	120,4	138,1	153,3	170,0	188,7	216,5
60	Q. El Rosario	26,9	32,6	38,4	47,7	56,2	66,1	77,9	96,8

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 38. Valores de ~~profundidad de lluvia~~ precipitación (mm) para diferentes periodos de retorno

ID	Cuenca	TR 2,33	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100	TR 200	TR 500
1	Q. Santa Elena	45,5	54,7	63,0	75,4	85,8	97,8	112,6	135,7
2	Q. La Picacha	44,5	51,5	57,6	66,5	73,2	80,8	89,3	103,2
3	Q. La Iguaná	50,4	57,8	66,4	77,4	85,8	94,5	102,8	117,3
4	Q. Doña María	60,4	68,4	75,1	85,6	95,6	106,9	119,4	138,4
5	Q. La Presidenta	31,3	38,7	45,0	53,9	61,1	69,0	80,0	97,2
6	Q. La Poblada	31,9	38,9	44,9	53,7	61,1	69,9	80,8	97,7
7	Q. Ana Diaz	44,5	51,5	57,5	66,3	73,6	81,8	91,0	105,5
8	Q. La Hondita	19,1	22,3	25,7	32,0	37,8	44,6	52,7	65,7
9	Q. La Hueso	46,1	53,2	60,0	69,6	76,7	83,9	92,4	106,6
10	Q. Potreritos	44,9	51,2	56,6	64,6	71,4	78,9	87,3	100,3
11	Q. La Volcana	26,2	35,3	42,7	52,0	58,9	65,7	73,8	91,1
12	Q. La Seca	34,8	42,6	49,7	60,8	70,9	82,7	96,4	118,1
13	Q. La Lejía	39,7	46,2	51,7	60,1	67,3	75,4	84,5	98,3
14	Q. La Escopetería	28,5	37,6	45,2	54,8	62,0	69,1	77,5	95,6
15	Q. La Sucia	54,7	61,4	67,5	76,4	86,5	97,8	110,4	130,1
16	Q. La Frisola	50,8	57,0	62,2	69,9	76,4	83,5	92,0	107,7
17	Q. La Aguacatala	34,9	45,0	53,3	63,8	71,5	79,1	92,0	113,5
18	Q. La Puerta - Borbollona	38,7	44,8	50,1	58,0	64,8	72,4	80,8	93,6
19	Q. El Ñato	32,3	40,2	47,4	59,0	69,6	82,2	97,0	120,8
20	Q. La Astillera	53,0	58,6	63,2	69,9	75,5	81,4	87,9	100,6
21	Q. Altavista	47,3	55,1	61,9	71,7	80,2	89,5	100,0	116,2
22	Q. Zúñiga	29,2	38,8	46,6	56,5	63,8	71,1	79,6	98,3
23	Q. El Hato - La Guayaba	35,8	41,4	46,3	53,6	59,9	66,9	74,7	86,5
24	Q. Canaveral - El Zancudo	28,2	35,1	41,4	51,5	60,7	71,5	84,4	104,9
25	Q. La Gómez	34,7	40,3	45,1	52,1	58,0	64,5	72,2	84,5
26	Q. La Guayabala	48,5	56,4	63,1	72,8	81,0	90,0	100,6	116,7
27	Q. El Ahorcado	29,9	37,3	44,0	54,8	64,7	76,4	90,2	112,3
28	Q. la Rafita - Chorro Hondo	29,1	36,3	42,8	53,3	62,9	74,3	87,7	109,3
29	Q. La Limona	50,1	57,5	63,8	73,2	81,2	90,1	100,0	114,8
30	Q. Piedra Gorda	42,0	51,1	59,6	73,1	85,3	99,7	116,5	143,3
31	Q. Piedras Blancas	46,3	54,6	62,2	76,6	89,9	105,5	124,0	153,6
32	Q. Miserenga	50,2	57,2	63,2	72,3	80,1	89,0	99,0	116,5
33	Q. Malpaso	35,1	41,2	46,2	53,1	58,4	64,1	70,2	83,9
34	Q. La Puerta	38,1	44,1	49,3	57,1	63,8	71,3	79,6	92,2
35	Q. La Pelahueso	38,7	44,8	50,1	58,0	64,8	72,4	80,8	93,6
36	Q. La Madera	37,7	45,0	51,3	60,8	69,1	78,4	89,2	107,4
37	Q. La Castro	35,9	44,7	52,8	65,7	77,5	91,5	107,9	134,4
38	Q. La Cantera Ramal Sur	25,3	29,5	33,1	38,7	43,4	48,8	54,9	64,0
39	Q. La Quintana	30,4	35,8	40,3	46,2	50,8	55,7	62,2	74,9
40	Q. La Chorrera - El Molino	35,3	44,0	51,9	64,6	76,3	90,0	106,2	132,3
41	Q. La Paulita	29,2	38,8	46,6	56,5	63,8	71,1	79,6	98,3
42	Q. La Moñonga	35,4	41,5	46,5	53,4	58,9	64,6	70,8	84,5

ID	Cuenca	TR 2,33	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100	TR 200	TR 500
43	Q. La Bermejala	34,3	42,4	49,8	61,3	71,7	83,9	98,2	122,1
44	Q. La Leonarda	37,9	43,9	49,0	56,8	63,5	70,9	79,2	91,7
45	Q. La Guayaba	27,1	31,4	35,1	40,7	45,4	50,8	56,7	65,7
46	Q. La Larga	53,2	61,0	67,6	77,4	85,8	95,1	105,4	120,8
47	Q. Agua Fría	36,6	42,3	47,3	54,8	61,2	68,4	76,4	88,4
48	Q. La Despensa	46,0	52,8	58,6	67,2	74,6	82,7	91,8	105,3
49	Q. La Honda	33,8	42,1	49,7	61,9	73,1	86,4	102,0	127,1
50	Q. Minitas	41,5	45,9	49,5	54,7	59,1	63,8	68,8	76,1
51	Q. La Cañada	36,7	42,2	46,8	53,7	59,6	66,1	73,3	84,1
52	Q. La Arenera	39,1	43,9	47,9	53,9	58,8	64,3	70,3	79,1
53	Q. La García	35,2	40,7	45,5	52,7	58,9	65,8	73,5	85,1
54	Q. La Zorrita	38,2	43,9	48,7	55,8	62,0	68,7	76,3	87,5
55	Q. La Potrera	34,2	39,6	44,3	51,3	57,3	64,0	71,5	82,8
56	Q. La Mauala	43,7	50,1	55,6	63,8	70,8	78,5	87,1	100,0
57	Q. La Manguala	51,1	58,6	65,0	74,6	82,8	91,9	101,9	117,0
58	Q. La Rafita	22,7	28,3	33,4	41,6	49,1	58,0	68,5	85,4
59	Q. La Candela	45,7	52,4	58,2	66,8	74,1	82,2	91,2	104,6
60	Q. El Rosario	42,6	51,7	60,8	75,5	88,9	104,7	123,4	153,2

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

8.4.6 Pérdidas hidrológicas y precipitación efectiva

Para la determinación de las pérdidas hidrológicas, es decir el agua que se infiltra y no aporta escorrentía durante el evento de creciente, se utilizó la metodología del número de curva del NRCS (ver numeral 3.1.2.1 Estudio hidrológico del Anexo 1 y numeral 8.4.6 Pérdidas hidrológicas y precipitación del Anexo 5). Para estimar dicho número, se realizó un cruce entre la información del tipo de suelo, la cual define el grupo hidrológico del suelo, y la cobertura vegetal.

En la Tabla 39 se muestra la relación entre las coberturas clasificadas según la metodología “Corine Land Cover” y la clasificación de coberturas del NRCS y su respectivo número de curva (CN). Mientras que en la Tabla 40 se presenta la clasificación hidrológica asignada a cada tipo de suelo. De esta forma fue posible cruzar la información de cobertura y tipo de suelo y generar un mapa de CN (Ilustración 159).

Con el objetivo de ser conservadores se definió grupo hidrológico tipo D para cualquier cobertura de urbana.

Tabla 39.Relación entre las coberturas clasificadas según la metodología “Corine Land Cover” y la clasificación de coberturas del NRCS

Cobertura “*Corine Land Cover*”	Cobertura NRCS	Condición Hidrológica	A	B	C	D
Tejido urbano continuo	Áreas residenciales - lotes 500 m2	N/A	77	85	90	92

Cobertura "*Corine Land Cover*"	Cobertura NRCS	Condición Hidrológica	A	B	C	D
Tejido urbano discontinuo	Áreas residenciales - lotes 1.000 m2	N/A	61	75	83	87
Zonas industriales o comerciales	Distritos urbanos - Comercio y negocios	N/A	89	92	94	95
Instalaciones recreativas	Espacios abiertos	Media	49	69	79	84
Caña panelera	Cultivos contorno	Buena	71	80	87	90
Café	Cultivos	Pobre	72	81	88	91
Pastos limpios	Pastos	Pobre	68	79	86	89
Pastos arbolados	Pastos	Media	49	69	79	84
Pastos enmalezados	Pastos	Buena	39	61	74	80
Mosaico de cultivos	Cultivos contorno	Buena	65	75	82	86
Mosaico de pastos y cultivos	Pastos + Cultivos contorno	Buena	52	68	78	83
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Cultivos + pastos + espacios naturales	Buena	48	66	77	82
Mosaico de pastos con espacios naturales	Pastos + espacios naturales	Buena	39	61	74	80
Mosaico de cultivos y espacios naturales	Cultivos contorno + Espacios naturales	Buena	52	68	78	83
Bosque natural denso	Bosques	Buena	30	55	70	77
Bosque natural fragmentado	Bosques	Media	35	60	73	79
Bosque de galería y/o riparia	Bosques	Buena	30	55	70	77
Bosque de galería y/o riparia	Bosques	Buena	30	55	70	77
Plantación forestal	Bosques	Pobre	45	66	77	83
Arbustos y matorrales	Rastrojo	Buena	30	48	65	73
Vegetación secundaria o en transición	Bosques	Pobre	45	66	77	83
Tierras desnudas y degradadas	Calles y carreteras - Destapada	-	72	82	87	89
Ríos	-	-	100	100	100	100
Plátano y banano	Cultivos	Pobre	72	81	88	91
Café	Cultivos	Pobre	72	81	88	91
Cítricos	Cultivos	Pobre	72	81	88	91
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	Bosques	Buena	30	55	70	77
Plantación de latifoliadas	Bosques	Pobre	45	66	77	83
Vegetación secundaria alta	Rastrojo	Buena	30	48	65	73
Vegetación secundaria baja	Rastrojo	Media	35	56	70	77
Rastrojo bajo	Rastrojo	Pobre	48	67	77	83
Bosque natural intervenido	Bosques	Pobre	45	66	77	83
Cultivo permanente	Cultivo contorno y terrazas	Buena	62	71	78	81
Bosque plantado	Bosques	Pobre	45	66	77	83
Construcciones	Áreas residenciales - lotes 500 m2	N/A	77	85	90	92

Cobertura "*Corine Land Cover*"	Cobertura NRCS	Condición Hidrológica	A	B	C	D
Rastrojo alto	Rastrojo	Buena	30	48	65	73
Construcciones	Áreas residenciales - lotes 500 m2	N/A	77	85	90	92
Rastrojo bajo	Rastrojo	Pobre	48	67	77	83
Pasto natural	Pastos	Buena	39	61	74	80
Bosque natural intervenido	Bosques	Pobre	45	66	77	83
Cultivo permanente	Cultivo contorno y terrazas	Buena	62	71	78	81
Pasto natural	Pastos	Buena	39	61	74	80

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 40.Clasificación hidrológica del suelo

Unidad Suelo	Descripción	Grupo Hidrológico
AGf2	Profundos y superficiales limitados por roca, bien drenados, texturas finas y medias algunos tienen alta saturación de aluminio reacción muy fuerte a moderadamente Ácida, fertilidad baja a moderada erosión ligera a moderada	C
CA	Cuerpo de agua	D
GSb	Superficiales y profundos, drenaje pobre a moderado, texturas moderadamente finas a gruesas, inundaciones ocasionales, fertilidad baja y alta	D
GSc	Superficiales y profundos, drenaje pobre a moderado, texturas moderadamente finas a gruesas, inundaciones ocasionales, fertilidad baja y alta	D
HBf	Profundos y superficiales limitados por piedra y gravilla, bien drenados, texturas al tacto moderadamente fina y medias con fragmentos de roca, reacción muy fuerte y fuertemente Ácida, fertilidad baja	C
HBf1	Profundos y superficiales limitados por piedra y gravilla, bien drenados, texturas al tacto moderadamente fina y medias con fragmentos de roca, reacción muy fuerte y fuertemente Ácida, fertilidad baja	C
ITe2	Profundos, bien drenados, texturas finas a medias, erosión ligera y moderada, fertilidad baja, reacción ligera a fuertemente Ácida	C
ITf2	Profundos, bien drenados, texturas finas a medias, erosión ligera y moderada, fertilidad baja, reacción ligera a fuertemente Ácida	C
LLd	Superficiales y muy superficiales, bien y pobremente drenados, texturas medias y material orgánico, reacción muy fuerte a fuertemente Ácida, alto contenido de aluminio, fertilidad baja	D
NQe2	Profundos, bien drenados, texturas finas a medias, erosión ligera a severa, fertilidad muy baja a moderada	C
NQf3	Profundos, bien drenados, texturas finas a medias, erosión ligera a severa, fertilidad muy baja a moderada	C
PSf2	Profundos, bien drenados, alta saturación de aluminio; texturas moderadamente gruesas a finas, reacción muy fuerte a fuertemente Ácida y fertilidad moderada a baja erosión ligera a moderada	C

Unidad Suelo	Descripción	Grupo Hidrológico
SAd1	Profundos a moderadamente profundos, drenaje natural bien drenados, texturas finas a medias, erosión ligera a moderada, reacción fuerte a moderadamente Ácida, fertilidad baja a muy baja	C
SAe1	Profundos a moderadamente profundos, drenaje natural bien drenados, texturas finas a medias, erosión ligera a moderada, reacción fuerte a moderadamente Ácida, fertilidad baja a muy baja	C
SAe2	Profundos a moderadamente profundos, drenaje natural bien drenados, texturas finas a medias, erosión ligera a moderada, reacción fuerte a moderadamente Ácida, fertilidad baja a muy baja	C
TEb	Profundos a moderadamente profundos, bien drenados, texturas medias, reacción muy fuerte a fuertemente Ácida, fertilidad baja a moderada, erosión ligera a moderada	B
TEb1	Profundos a moderadamente profundos, bien drenados, texturas medias, reacción muy fuerte a fuertemente Ácida, fertilidad baja a moderada, erosión ligera a moderada	B
TEc1	Profundos a moderadamente profundos, bien drenados, texturas medias, reacción muy fuerte a fuertemente Ácida, fertilidad baja a moderada, erosión ligera a moderada	B
TEd1	Profundos a moderadamente profundos, bien drenados, texturas medias, reacción muy fuerte a fuertemente Ácida, fertilidad baja a moderada, erosión ligera a moderada	B
TEd2	Profundos a moderadamente profundos, bien drenados, texturas medias, reacción muy fuerte a fuertemente Ácida, fertilidad baja a moderada, erosión ligera a moderada	B
TEe1	Profundos a moderadamente profundos, bien drenados, texturas medias, reacción muy fuerte a fuertemente Ácida, fertilidad baja a moderada, erosión ligera a moderada	B
TEe2	Profundos a moderadamente profundos, bien drenados, texturas medias, reacción muy fuerte a fuertemente Ácida, fertilidad baja a moderada, erosión ligera a moderada	B
TEf1	Profundos a moderadamente profundos, bien drenados, texturas medias, reacción muy fuerte a fuertemente Ácida, fertilidad baja a moderada, erosión ligera a moderada	B
TEf2	Profundos a moderadamente profundos, bien drenados, texturas medias, reacción muy fuerte a fuertemente Ácida, fertilidad baja a moderada, erosión ligera a moderada	B
TGd1	Profundos a moderadamente profundos, bien drenados, texturas moderadamente finas y finas, reacción moderadamente Ácida a neutra, fertilidad alta a moderada erosión ligera a moderada	B
YAd1	Profundos, bien drenados, texturas medias y finas, erosión ligera y moderada, fertilidad baja, reacción muy fuerte a fuertemente Ácida	C
YAe1	Profundos, bien drenados, texturas medias y finas, erosión ligera y moderada, fertilidad baja, reacción muy fuerte a fuertemente Ácida	C
YAe2	Profundos, bien drenados, texturas medias y finas, erosión ligera y moderada, fertilidad baja, reacción muy fuerte a fuertemente Ácida	C
YAf1	Profundos, bien drenados, texturas medias y finas, erosión ligera y moderada, fertilidad baja, reacción muy fuerte a fuertemente Ácida	C
YAf2	Profundos, bien drenados, texturas medias y finas, erosión ligera y moderada, fertilidad baja, reacción muy fuerte a fuertemente Ácida	C
ZLe1	Profundos, drenaje natural moderado a bueno, texturas variadas, fertilidad muy baja, fertilidad muy baja erosión ligera a severa	C

Unidad Suelo	Descripción	Grupo Hidrológico
ZLf1	Profundos, drenaje natural moderado a bueno, texturas variadas, fertilidad muy baja, fertilidad muy baja erosión ligera a severa	C
ZU	Zona urbana	D

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

En la Ilustración 159 se presenta el número de curva estimado para cada una de las cuencas priorizadas, así como los respectivos parámetros de abstracción inicial (I_a) y almacenamiento (S) definidos en la metodología para la estimación de pérdidas hidrológicas propuesta por el NRCS. Para la condición de diseño se definió una condición de humedad antecedente AMCII y un coeficiente α de 0,05 para el cálculo de la abstracción inicial.

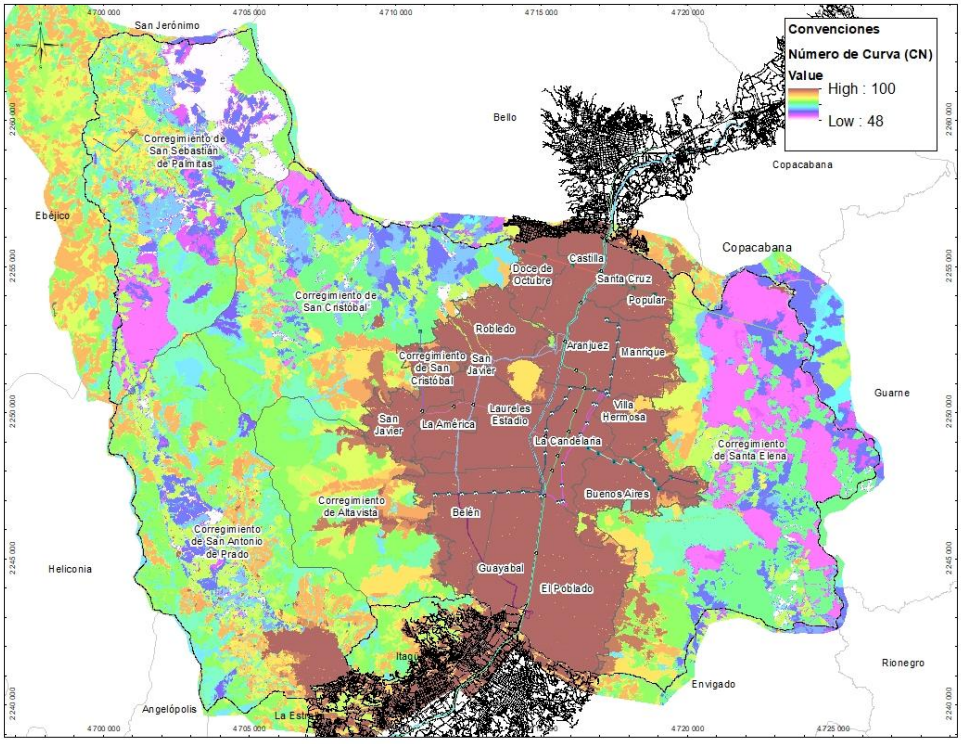


Ilustración 159. Mapa de número de curva

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 41.Número de curva, pérdidas hidrológicas y precipitación efectiva en las cuencas priorizadas

ID	Cuenca	CN	Almacenamiento (S) (mm)	α	Abstracción Inicial - I_a (mm)
1	Q. Santa Elena	73	92,5	0,05	4,6
2	Q. La Picacha	85	45,2	0,05	2,3
3	Q. La Iguaná	76	82,0	0,05	4,1
4	Q. Doña María	77	75,0	0,05	3,8

ID	Cuenca	CN	Almacenamiento (S) (mm)	α	Abstracción Inicial - I_a (mm)
5	Q. La Presidenta	83	52,0	0,05	2,6
6	Q. La Poblada	84	49,5	0,05	2,5
7	Q. Ana Diaz	81	58,4	0,05	2,9
8	Q. La Hondita	82	56,5	0,05	2,8
9	Q. La Hueso	86	41,7	0,05	2,1
10	Q. Potreritos	75	84,2	0,05	4,2
11	Q. La Volcana	84	48,0	0,05	2,4
12	Q. La Seca	85	45,5	0,05	2,3
13	Q. La Lejía	68	121,7	0,05	6,1
14	Q. La Escopetería	87	37,6	0,05	1,9
15	Q. La Sucia	72	97,8	0,05	4,9
16	Q. La Frisola	71	102,7	0,05	5,1
17	Q. La Aguacatala	84	48,7	0,05	2,4
18	Q. La Puerta - Borbollona	73	96,3	0,05	4,8
19	Q. El Ñato	70	108,9	0,05	5,4
20	Q. La Astillera	76	81,5	0,05	4,1
21	Q. Altavista	85	44,1	0,05	2,2
22	Q. Zúñiga	86	40,3	0,05	2,0
23	Q. El Hato - La Guayaba	71	102,2	0,05	5,1
24	Q. Canaveral - El Zancudo	87	38,6	0,05	1,9
25	Q. La Gómez	80	63,5	0,05	3,2
26	Q. La Guayabala	81	60,0	0,05	3,0
27	Q. El Ahorcado	88	35,0	0,05	1,7
28	Q. la Rafita - Chorro Hondo	87	39,6	0,05	2,0
29	Q. La Limona	81	58,0	0,05	2,9
30	Q. Piedra Gorda	64	144,1	0,05	7,2
31	Q. Piedras Blancas	66	133,2	0,05	6,7
32	Q. Miserenga	68	122,3	0,05	6,1
33	Q. Malpaso	86	42,0	0,05	2,1
34	Q. La Puerta	71	103,2	0,05	5,2
35	Q. La Pelahueso	88	36,0	0,05	1,8
36	Q. La Madera	79	66,7	0,05	3,3
37	Q. La Castro	73	94,4	0,05	4,7
38	Q. La Cantera Ramal Sur	82	57,3	0,05	2,9
39	Q. La Quintana	86	41,0	0,05	2,1
40	Q. La Chorrera - El Molino	86	41,3	0,05	2,1
41	Q. La Paulita	90	27,0	0,05	1,3
42	Q. La Moñonga	86	42,7	0,05	2,1
43	Q. La Bermejala	90	28,2	0,05	1,4
44	Q. La Leonarda	83	50,6	0,05	2,5
45	Q. La Guayaba	77	74,2	0,05	3,7
46	Q. La Larga	75	86,9	0,05	4,3
47	Q. Agua Fría	69	114,7	0,05	5,7

ID	Cuenca	CN	Almacenamiento (S) (mm)	α	Abstracción Inicial - I_a (mm)
48	Q. La Despensa	75	86,9	0,05	4,3
49	Q. La Honda	84	47,7	0,05	2,4
50	Q. Minitas	74	87,4	0,05	4,4
51	Q. La Cañada	92	22,1	0,05	1,1
52	Q. La Arenera	76	80,7	0,05	4,0
53	Q. La García	75	83,8	0,05	4,2
54	Q. La Zorrita	75	85,6	0,05	4,3
55	Q. La Potrera	81	60,7	0,05	3,0
56	Q. La Mauala	87	38,0	0,05	1,9
57	Q. La Manguala	80	63,9	0,05	3,2
58	Q. La Rafita	84	47,7	0,05	2,4
59	Q. La Candela	74	88,8	0,05	4,4
60	Q. El Rosario	67	127,4	0,05	6,4

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Con base en los valores de almacenamiento y abstracción inicial, utilizando la metodología de pérdidas hidrológicas del NRCS, se estimaron los valores de precipitación efectiva en las cuencas priorizadas (Tabla 42).

Tabla 42. Valores de precipitación efectiva (mm) para diferentes periodos de retorno

ID	Cuenca	TR 2	TR 5	TR10	TR 25	TR50	TR100	TR 200	TR500
1	Q. Santa Elena	10,7	15,2	19,3	25,2	30,1	35,4	41,2	49,6
2	Q. La Picacha	16,1	21,5	26,4	33,4	39,0	45,0	51,5	60,8
3	Q. La Iguaná	13,7	20,0	25,7	33,3	39,4	46,0	52,6	61,8
4	Q. Doña María	16,1	22,1	27,4	35,1	41,5	48,5	56,0	67,2
5	Q. La Presidenta	10,0	14,5	18,7	25,0	30,5	36,6	43,8	54,3
6	Q. La Poblada	10,7	15,1	19,2	25,6	31,3	37,8	45,5	57,1
7	Q. Ana Diaz	14,1	19,4	24,2	30,9	36,3	41,9	48,1	56,5
8	Q. La Hondita	2,6	4,1	5,5	7,4	8,9	10,6	12,3	14,8
9	Q. La Hueso	18,5	25,0	30,8	38,7	44,9	51,6	58,6	68,5
10	Q. Potreritos	8,9	12,5	15,9	20,9	25,2	29,7	35,0	42,5
11	Q. La Volcana	7,6	12,9	17,7	24,4	29,6	35,0	40,5	48,5
12	Q. La Seca	11,3	15,6	19,2	24,4	28,5	32,6	37,0	42,9
13	Q. La Lejía	4,8	7,3	9,7	13,2	16,1	19,0	22,5	27,2
14	Q. La Escopetería	10,6	16,9	22,6	30,2	36,1	42,2	48,5	57,5
15	Q. La Sucia	12,4	17,3	21,9	29,0	35,4	42,7	51,1	64,2
16	Q. La Frisola	8,8	12,3	15,7	21,0	25,7	31,1	37,4	47,1
17	Q. La Aguacatala	12,7	19,5	25,6	33,8	40,1	46,5	53,4	62,4
18	Q. La Puerta - Borbollona	5,6	8,4	11,0	14,9	17,9	21,0	24,8	29,7
19	Q. El Ñato	4,2	6,9	9,5	13,1	16,0	19,2	22,7	27,6

ID	Cuenca	TR 2	TR 5	TR10	TR 25	TR50	TR100	TR 200	TR500
20	Q. La Astillera	9,5	12,9	16,1	21,5	26,5	32,5	39,7	51,1
21	Q. Altavista	17,2	22,8	27,9	35,2	41,3	48,0	55,4	66,2
22	Q. Zúñiga	10,5	17,0	22,8	30,6	36,6	42,7	48,9	57,9
23	Q. El Hato - La Guayaba	3,5	5,7	7,8	10,9	13,3	15,8	18,9	22,9
24	Q. Canaveral - El Zancudo	9,2	12,8	15,8	19,9	23,0	26,2	29,7	34,3
25	Q. La Gómez	6,6	9,6	12,4	16,5	19,9	23,3	27,4	33,0
26	Q. La Guayabala	13,8	18,5	23,0	28,9	33,7	38,6	44,1	51,3
27	Q. El Ahorcado	11,4	15,4	18,7	23,2	26,6	30,1	33,8	38,8
28	Q. la Rafita - Chorro Hondo	9,9	13,6	16,7	20,9	24,1	27,4	31,0	35,7
29	Q. La Limona	13,6	18,1	22,2	27,7	32,2	36,5	41,5	47,9
30	Q. Piedra Gorda	6,1	9,1	11,9	15,9	19,1	22,6	26,4	31,5
31	Q. Piedras Blancas	7,5	10,8	13,8	18,0	21,3	24,7	28,5	33,5
32	Q. Miserenga	6,3	9,3	12,1	16,6	20,8	25,6	31,3	40,3
33	Q. Malpaso	10,8	14,4	17,7	22,7	27,0	31,7	37,1	45,2
34	Q. La Puerta	4,8	7,4	9,8	13,3	16,2	19,0	22,5	27,1
35	Q. La Pelahueso	13,1	18,0	22,3	28,3	32,9	37,3	42,5	49,2
36	Q. La Madera	8,1	11,8	15,2	20,1	24,0	28,3	33,1	39,7
37	Q. La Castro	7,1	10,3	13,2	17,3	20,6	24,1	28,0	33,2
38	Q. La Cantera Ramal Sur	5,0	7,1	9,0	12,1	14,8	18,0	21,7	27,4
39	Q. La Quintana	8,8	11,9	14,7	19,0	22,7	26,9	31,8	39,2
40	Q. La Chorrera - El Molino	13,6	18,2	22,1	27,3	31,3	35,4	39,9	45,7
41	Q. La Paulita	13,7	21,1	27,7	36,2	42,7	49,3	55,9	65,4
42	Q. La Moñonga	10,8	14,4	17,8	22,8	27,1	31,8	37,2	45,2
43	Q. La Bermejala	15,9	20,7	24,7	30,1	34,4	38,8	43,5	50,0
44	Q. La Leonarda	9,4	13,5	17,2	22,3	26,3	30,1	34,8	40,8
45	Q. La Guayaba	1,0	2,3	3,8	5,9	7,7	9,6	11,7	14,7
46	Q. La Larga	11,3	15,2	18,9	24,0	28,1	32,4	37,1	43,5
47	Q. Agua Fría	3,4	5,5	7,5	10,5	12,9	15,3	18,3	22,3
48	Q. La Despensa	7,0	10,1	13,1	17,1	20,3	23,6	27,4	32,4
49	Q. La Honda	11,3	15,4	19,0	23,7	27,5	31,2	35,3	40,7
50	Q. Minitas	4,9	6,8	8,7	12,0	15,0	18,8	23,3	30,7
51	Q. La Cañada	6,8	11,0	14,7	19,6	23,3	27,1	31,1	36,4
52	Q. La Arenera	4,8	7,1	9,3	12,7	15,7	19,2	23,4	29,8
53	Q. La García	4,0	6,6	8,9	12,3	15,0	17,7	21,0	25,3
54	Q. La Zorrita	2,3	4,3	6,3	9,1	11,3	13,7	16,4	20,1
55	Q. La Potrera	5,0	8,0	10,8	14,6	17,7	20,6	24,3	29,0
56	Q. La Mauala	11,2	15,9	20,0	25,3	29,5	33,6	38,3	44,3
57	Q. La Manguala	13,4	17,7	21,8	27,2	31,6	36,0	40,9	47,4
58	Q. La Rafita	5,7	8,2	10,4	13,5	15,8	18,3	21,0	24,5
59	Q. La Candela	6,6	9,7	12,6	16,5	19,7	22,9	26,6	31,5

ID	Cuenca	TR 2	TR 5	TR10	TR 25	TR50	TR100	TR 200	TR500
60	Q. El Rosario	7,7	11,0	14,0	18,2	21,6	25,2	29,1	34,4

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Coeficiente de escorrentía

En la literatura actual existen diversas referencias para la estimación de los coeficientes de escorrentía utilizados en el Método Racional Probabilístico. En el estudio hidrológico realizado para el Distrito de Medellín, el coeficiente de escorrentía "C" se estimó con base en la metodología planteada por (Natural Resources Conservation Service, 2007). Quien propone la siguiente relación con el número de curva mediante el almacenamiento y la abstracción inicial:

$$C = \frac{E_s}{P} = \frac{(P - I_a)^2}{P^2 + 4 \cdot P \cdot I_a}$$

Donde, P es la escorrentía superficial, en mm, Ia es la abstracción inicial, en mm

De esta manera, para cada evento de precipitación se estima el respectivo coeficiente de escorrentía. Estos valores se presentan en la Tabla 43.

Tabla 43. Coeficiente de escorrentía estimado para las cuencas priorizadas

ID	Cuenca	TR2	TR5	TR10	TR25	TR50	TR100	TR200	TR500
1	Q. Santa Elena	0,57	0,63	0,66	0,71	0,74	0,76	0,79	0,82
2	Q. La Picacha	0,75	0,78	0,80	0,82	0,84	0,85	0,86	0,88
3	Q. La Iguaná	0,64	0,67	0,71	0,74	0,76	0,78	0,80	0,82
4	Q. Doña María	0,70	0,73	0,75	0,78	0,80	0,82	0,83	0,85
5	Q. La Presidenta	0,63	0,69	0,72	0,76	0,78	0,80	0,83	0,86
6	Q. La Poblada	0,65	0,70	0,73	0,77	0,79	0,82	0,84	0,86
7	Q. Ana Diaz	0,69	0,73	0,75	0,78	0,80	0,81	0,83	0,85
8	Q. La Hondita	0,46	0,51	0,55	0,61	0,66	0,70	0,74	0,78
9	Q. La Hueso	0,77	0,80	0,82	0,84	0,85	0,87	0,88	0,89
10	Q. Potreritos	0,60	0,63	0,66	0,69	0,72	0,74	0,76	0,79
11	Q. La Volcana	0,60	0,68	0,73	0,77	0,79	0,81	0,83	0,86
12	Q. La Seca	0,69	0,74	0,77	0,81	0,83	0,85	0,87	0,89
13	Q. La Lejía	0,44	0,49	0,53	0,57	0,61	0,64	0,67	0,71
14	Q. La Escopetería	0,69	0,75	0,79	0,82	0,84	0,85	0,87	0,89
15	Q. La Sucia	0,61	0,64	0,67	0,70	0,73	0,75	0,78	0,81
16	Q. La Frisola	0,58	0,61	0,63	0,66	0,69	0,71	0,73	0,76
17	Q. La Aguacatala	0,68	0,74	0,77	0,80	0,82	0,84	0,86	0,88
18	Q. La Puerta - Borbollona	0,51	0,56	0,59	0,63	0,66	0,69	0,71	0,75
19	Q. El Ñato	0,41	0,48	0,54	0,60	0,65	0,69	0,73	0,77
20	Q. La Astillera	0,65	0,68	0,70	0,72	0,74	0,75	0,77	0,79

ID	Cuenca	TR2	TR5	TR10	TR25	TR50	TR100	TR200	TR500
21	Q. Altavista	0,77	0,79	0,81	0,84	0,85	0,87	0,88	0,89
22	Q. Zúñiga	0,68	0,74	0,78	0,81	0,83	0,85	0,86	0,89
23	Q. El Hato - La Guayaba	0,47	0,51	0,55	0,59	0,62	0,65	0,68	0,72
24	Q. Canaveral - El Zancudo	0,68	0,73	0,77	0,81	0,83	0,85	0,87	0,90
25	Q. La Gómez	0,60	0,65	0,67	0,71	0,73	0,76	0,78	0,81
26	Q. La Guayabala	0,71	0,74	0,76	0,79	0,81	0,82	0,84	0,86
27	Q. El Ahorcado	0,72	0,76	0,80	0,83	0,85	0,87	0,89	0,91
28	Q. la Rafita - Chorro Hondo	0,68	0,73	0,77	0,81	0,83	0,86	0,88	0,90
29	Q. La Limona	0,72	0,75	0,77	0,80	0,81	0,83	0,84	0,86
30	Q. Piedra Gorda	0,41	0,47	0,52	0,58	0,63	0,67	0,71	0,75
31	Q. Piedras Blancas	0,47	0,52	0,56	0,62	0,66	0,70	0,74	0,78
32	Q. Miserenga	0,52	0,56	0,59	0,63	0,65	0,68	0,71	0,74
33	Q. Malpaso	0,71	0,75	0,77	0,80	0,81	0,83	0,84	0,86
34	Q. La Puerta	0,48	0,53	0,56	0,61	0,64	0,67	0,69	0,73
35	Q. La Pelahueso	0,77	0,79	0,81	0,84	0,85	0,86	0,88	0,89
36	Q. La Madera	0,61	0,66	0,69	0,73	0,76	0,78	0,81	0,84
37	Q. La Castro	0,49	0,56	0,61	0,67	0,71	0,75	0,78	0,82
38	Q. La Cantera Ramal Sur	0,54	0,59	0,62	0,66	0,69	0,72	0,74	0,77
39	Q. La Quintana	0,68	0,72	0,75	0,78	0,79	0,81	0,83	0,85
40	Q. La Chorrera - El Molino	0,72	0,76	0,80	0,83	0,85	0,87	0,89	0,91
41	Q. La Paulita	0,77	0,82	0,85	0,87	0,88	0,89	0,91	0,92
42	Q. La Moñonga	0,71	0,75	0,77	0,79	0,81	0,83	0,84	0,86
43	Q. La Bermejala	0,79	0,82	0,85	0,87	0,89	0,91	0,92	0,93
44	Q. La Leonarda	0,69	0,72	0,75	0,77	0,80	0,81	0,83	0,85
45	Q. La Guayaba	0,48	0,53	0,56	0,61	0,64	0,66	0,69	0,73
46	Q. La Larga	0,64	0,67	0,70	0,73	0,75	0,77	0,79	0,81
47	Q. Agua Fría	0,44	0,48	0,52	0,57	0,60	0,63	0,66	0,69
48	Q. La Despensa	0,60	0,63	0,66	0,69	0,72	0,74	0,76	0,79
49	Q. La Honda	0,67	0,73	0,76	0,80	0,83	0,85	0,87	0,90
50	Q. Minitas	0,56	0,59	0,61	0,64	0,66	0,68	0,70	0,72
51	Q. La Cañada	0,84	0,86	0,87	0,89	0,90	0,91	0,91	0,93
52	Q. La Arenera	0,57	0,60	0,63	0,66	0,68	0,70	0,72	0,75
53	Q. La García	0,53	0,57	0,60	0,64	0,67	0,70	0,72	0,76
54	Q. La Zorrita	0,54	0,59	0,62	0,65	0,68	0,70	0,73	0,76
55	Q. La Potrera	0,61	0,65	0,68	0,72	0,74	0,76	0,78	0,81
56	Q. La Mauala	0,78	0,80	0,82	0,84	0,86	0,87	0,88	0,89
57	Q. La Manguala	0,70	0,73	0,76	0,78	0,80	0,82	0,83	0,85
58	Q. La Rafita	0,56	0,63	0,67	0,72	0,76	0,79	0,82	0,85
59	Q. La Candela	0,59	0,63	0,65	0,69	0,71	0,74	0,76	0,78
60	Q. El Rosario	0,45	0,51	0,56	0,63	0,67	0,71	0,75	0,79

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

8.4.7 Distribución temporal de la tormenta

Con base en el número de curva, pérdidas hidrológicas y aplicando la metodología de bloques alternantes propuesta por (Chow, 1988), se construyeron los hietogramas de precipitación total y precipitación efectiva. En la Ilustración 160 e Ilustración 161 se presentan algunos ejemplos de los aguaceros de diseño estimados para las cuencas estudiadas.

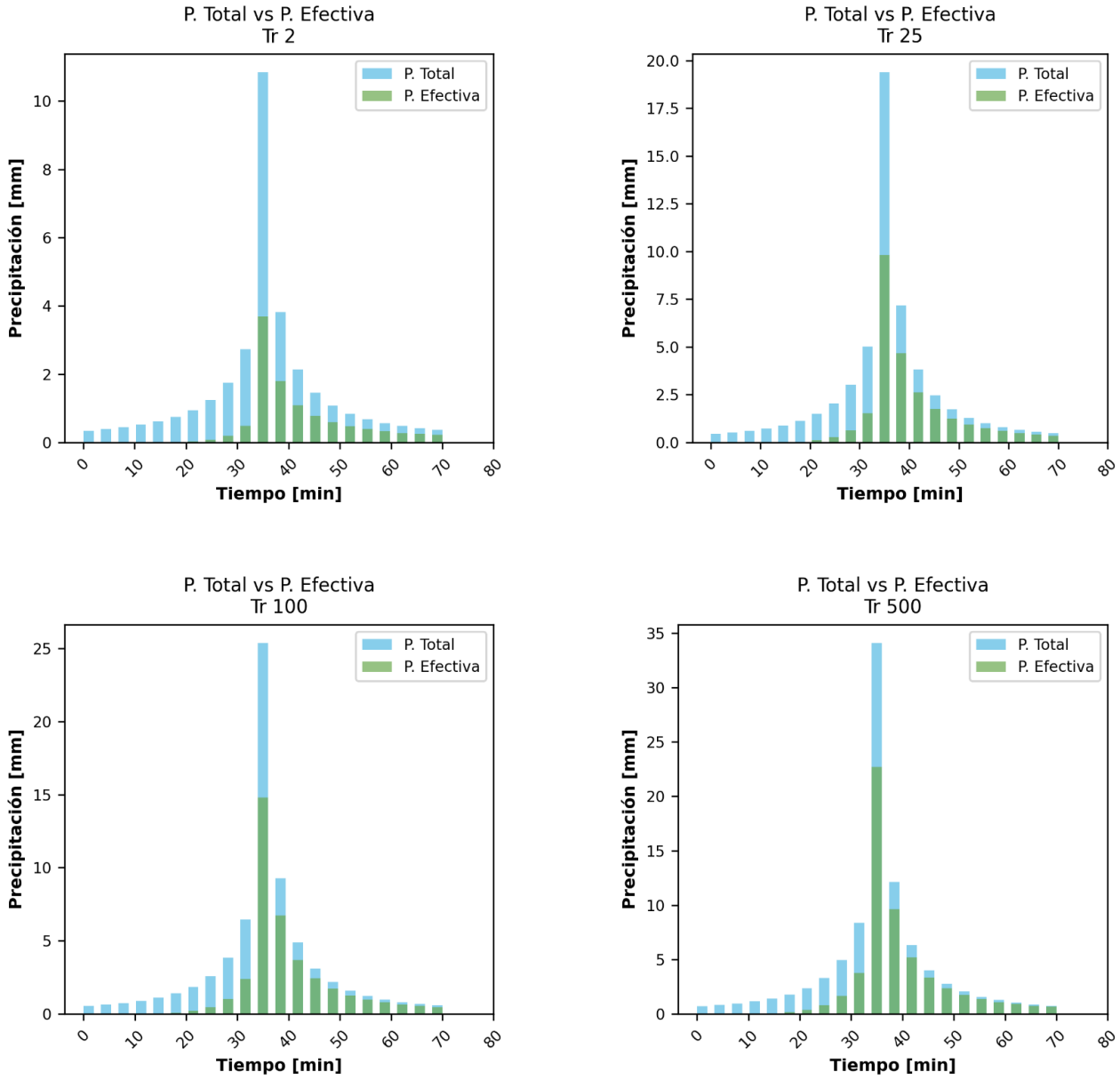


Ilustración 160. Aguacero de diseño en la quebrada La Presidenta

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

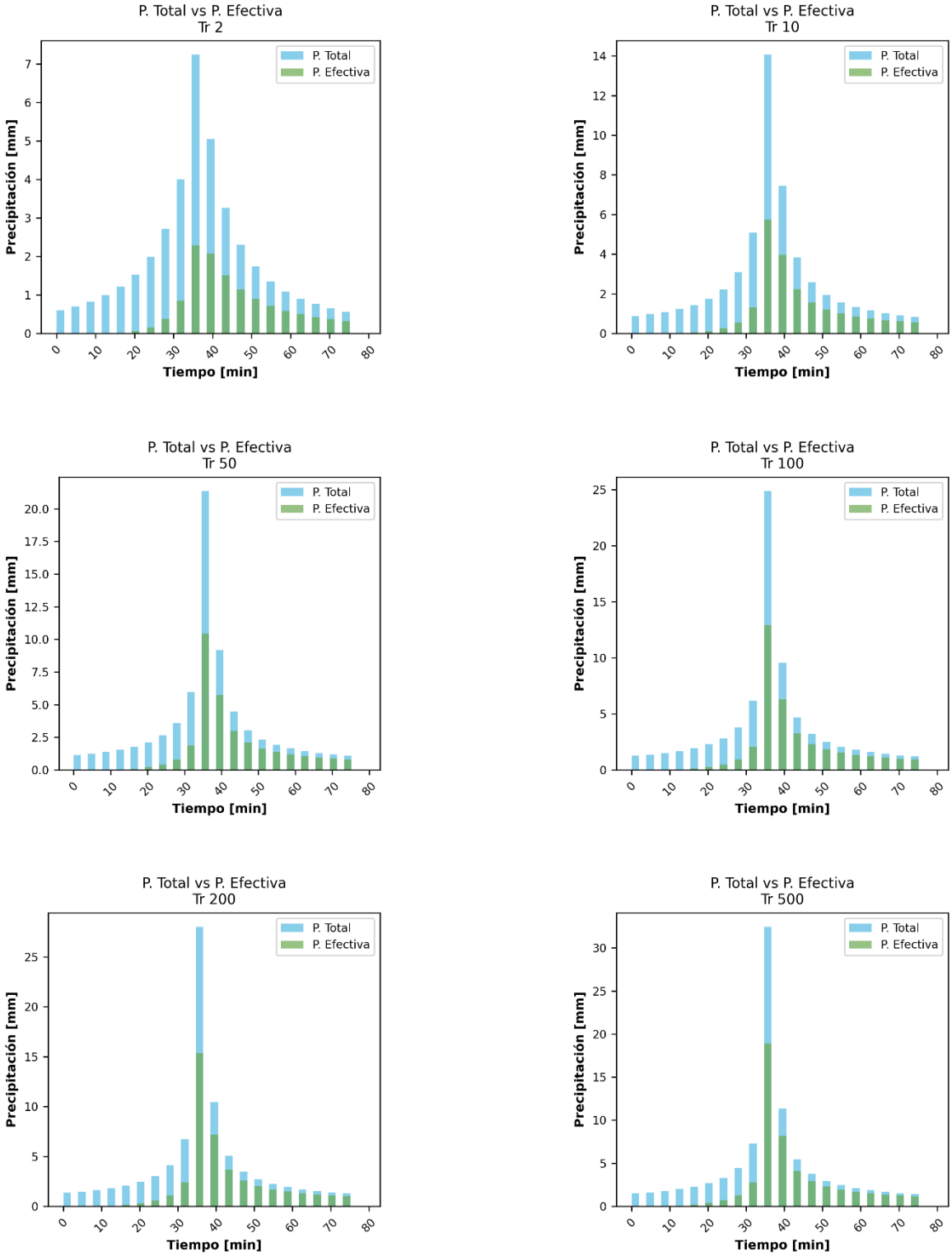


Ilustración 161. Aguacero de diseño en la quebrada Ana Díaz

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

8.4.8 Cálculo de caudales máximos

A partir de los valores de intensidad de lluvia, número de curva, coeficiente de escorrentía y el área se obtuvieron los valores de caudal máximo para diferentes periodos de retorno con las metodologías de hidrógrafas unitarias del SCS, Snyder y Clark y Racional (ver numeral 3.1.2.1.3 Cálculo de caudales máximos del Anexo 1). En la Ilustración 162 a Ilustración 167 se presentan algunos resultados obtenidos. En la Tabla 44 a Tabla 48 se presentan los caudales máximos estimados por las diferentes metodologías y un período de retorno de 100 años.

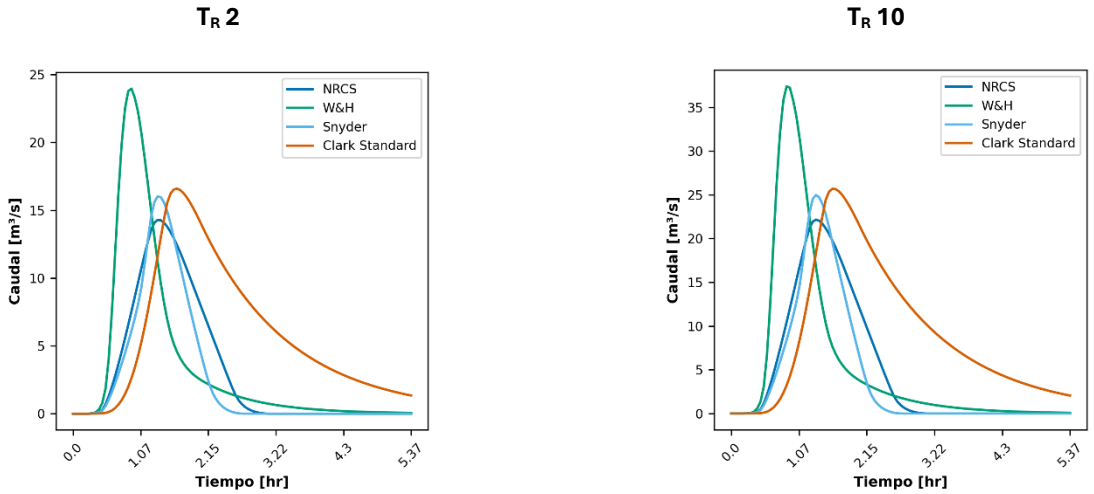


Ilustración 162. Hidrógrafa de respuesta de la quebrada Doña María para Tr 2 años (izquierda) y 10 años (derecha).

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

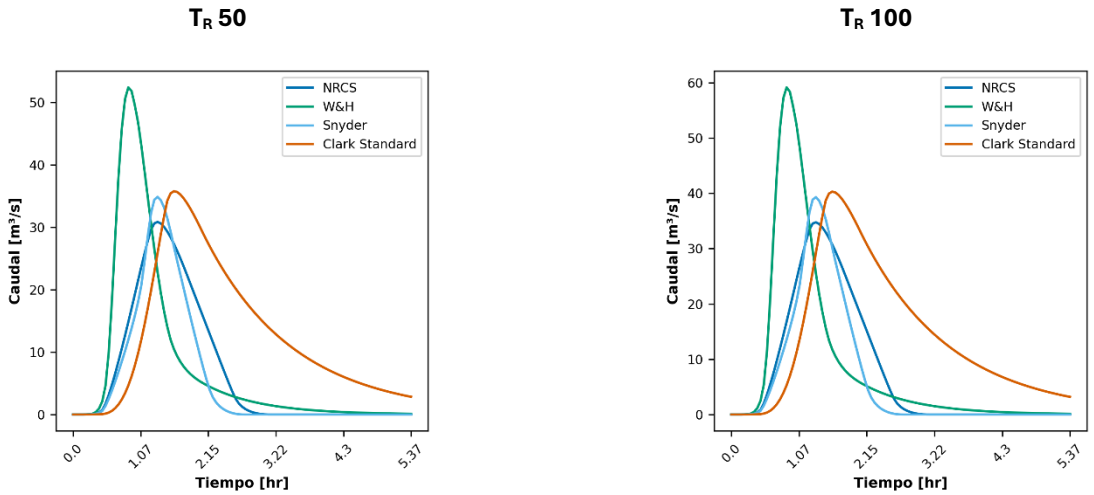


Ilustración 163. Hidrógrafa de respuesta de la quebrada Doña María para Tr 50 años (izquierda) y 100 años (derecha).

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

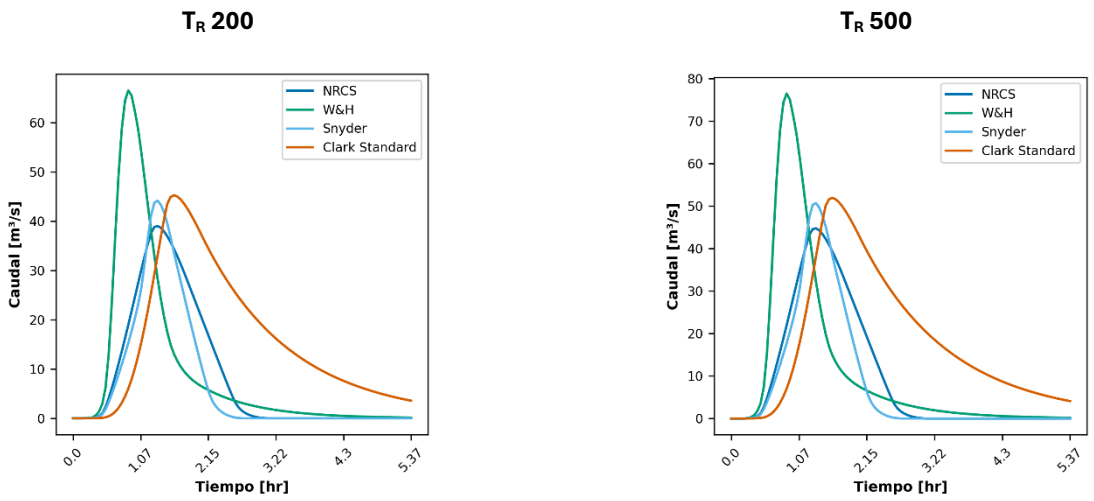


Ilustración 164. Hidrógrafa de respuesta de la quebrada Doña María para Tr 200 años (izquierda) y 500 años (derecha).

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

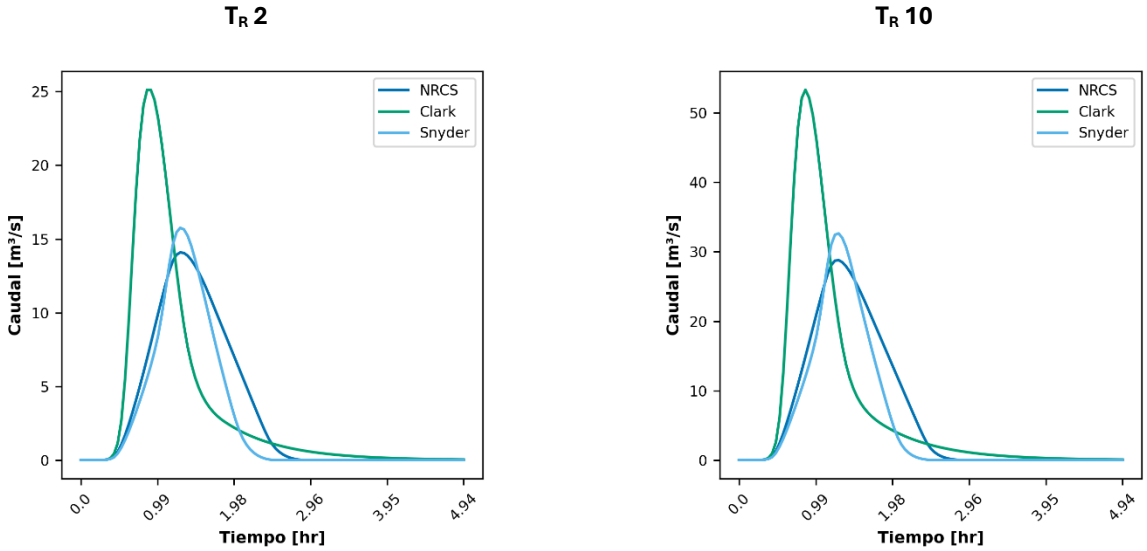


Ilustración 165. Hidrógrafa de respuesta de la quebrada La Aguacatala para Tr 2 años (izquierda) y 10 años (derecha).

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

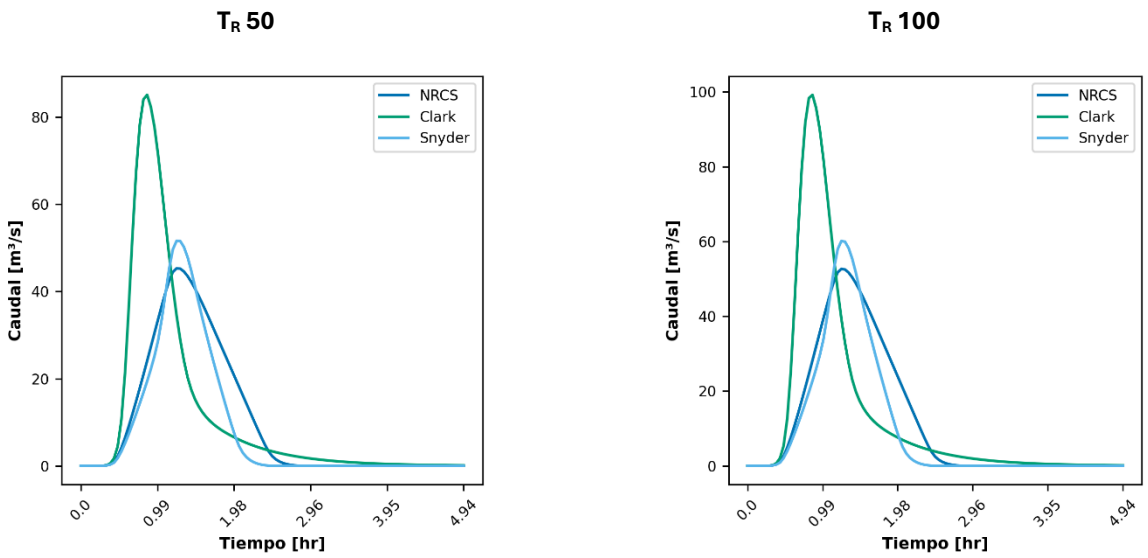


Ilustración 166. Hidrógrafa de respuesta de la quebrada La Aguacatala para Tr 50 años (izquierda) y 100 años (derecha).

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

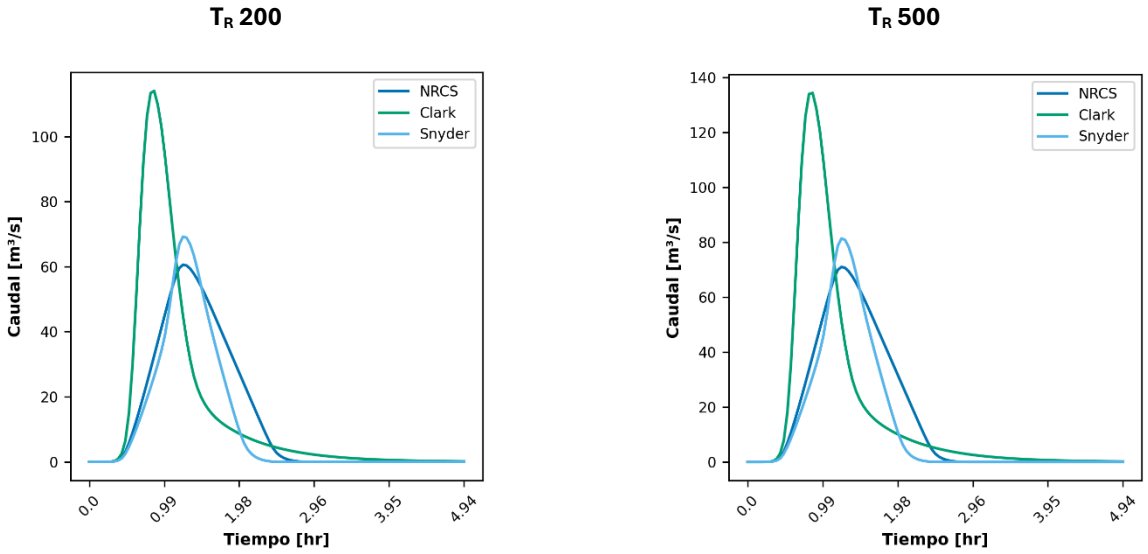


Ilustración 167. Hidrógrafa de respuesta de la quebrada La Aguacatala para Tr 200 años (izquierda) y 500 años (derecha).

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 44. Caudales máximos (m^3/s) estimados para las cuencas priorizadas por el método de Snyder

ID	Cuenca	TR2	TR5	TR10	TR25	TR50	TR100	TR200	TR500
1	Q. Santa Elena	58,52	83,67	107,16	140,91	168,77	199,25	232,92	281,38
2	Q. La Picacha	34,06	45,83	56,42	71,49	83,65	96,52	111,20	131,84
3	Q. La Iguaná	79,16	113,93	145,30	188,60	223,08	259,64	297,97	351,21

ID	Cuenca	TR2	TR5	TR10	TR25	TR50	TR100	TR200	TR500
4	Q. Doña María	122,34	166,46	206,13	263,54	311,47	363,98	421,62	506,40
5	Q. La Presidenta	22,81	33,64	43,72	58,86	71,96	86,70	103,61	129,08
6	Q. La Poblada	33,36	47,63	61,05	81,85	100,36	121,66	146,56	184,68
7	Q. Ana Diaz	23,47	32,30	40,40	51,89	60,99	70,40	81,00	95,62
8	Q. La Hondita	0,82	1,29	1,72	2,33	2,82	3,34	3,90	4,67
9	Q. La Hueso	70,94	95,49	117,26	147,61	171,68	197,03	225,07	263,98
10	Q. Potreritos	22,69	32,25	41,19	54,81	66,13	78,20	92,50	112,78
11	Q. La Volcana	2,73	4,67	6,46	8,91	10,85	12,84	14,90	17,85
12	Q. La Seca	12,34	17,41	21,62	27,82	32,67	37,51	42,80	49,82
13	Q. La Lejía	7,55	11,66	15,58	21,51	26,25	31,07	36,94	44,77
14	Q. La Escopetería	8,98	14,44	19,36	26,05	31,27	36,63	42,18	50,13
15	Q. La Sucia	117,01	163,48	207,00	275,03	335,87	406,16	487,56	613,77
16	Q. La Frisola	31,74	44,91	57,43	77,23	95,22	115,85	140,30	177,91
17	Q. La Aguacatala	15,85	24,88	32,97	43,79	52,15	60,71	69,90	82,25
18	Q. La Puerta - Borbollona	5,75	8,77	11,66	15,87	19,21	22,62	26,79	32,27
19	Q. El Ñato	5,85	9,81	13,55	18,86	23,22	27,97	33,29	40,63
20	Q. La Astillera	16,62	22,68	28,50	38,15	47,21	58,06	70,98	91,78
21	Q. Altavista	102,28	137,10	169,01	215,02	253,80	295,97	343,47	412,70
22	Q. Zúñiga	6,98	11,36	15,34	20,69	24,83	29,04	33,37	39,50
23	Q. El Hato - La Guayaba	1,83	3,05	4,22	5,93	7,33	8,75	10,50	12,82
24	Q. Cañaveral - El Zancudo	5,01	7,01	8,71	11,02	12,80	14,62	16,61	19,24
25	Q. La Gómez	4,68	7,02	9,18	12,32	14,88	17,58	20,80	25,22
26	Q. La Guayabala	17,11	23,37	29,15	37,09	43,54	50,06	57,35	67,16
27	Q. El Ahorcado	6,02	8,16	10,00	12,46	14,36	16,27	18,35	21,08
28	Q. la Rafita - Chorro Hondo	4,81	6,63	8,18	10,28	11,91	13,55	15,36	17,78
29	Q. La Limona	13,78	18,73	23,26	29,32	34,27	39,16	44,68	51,93
30	Q. Piedra Gorda	7,74	12,32	16,62	22,75	27,71	33,15	39,05	47,16
31	Q. Piedras Blancas	43,32	63,19	81,65	108,98	131,08	154,51	180,00	214,88
32	Q. Miserenga	14,80	21,89	28,82	39,79	49,79	61,61	75,48	97,29
33	Q. Malpaso	12,58	16,98	21,03	27,17	32,41	38,19	44,94	54,92
34	Q. La Puerta	6,61	10,32	13,80	19,02	23,19	27,38	32,54	39,35
35	Q. La Pelahueso	10,14	14,34	18,04	23,20	27,11	30,91	35,40	41,11
36	Q. La Madera	8,49	12,60	16,37	21,77	26,22	30,98	36,38	43,90
37	Q. La Castro	8,97	13,30	17,19	22,63	27,04	31,81	37,05	44,24

ID	Cuenca	TR2	TR5	TR10	TR25	TR50	TR100	TR200	TR500
38	Q. La Cantera Ramal Sur	1,83	2,63	3,39	4,57	5,64	6,86	8,32	10,56
39	Q. La Quintana	6,58	8,99	11,18	14,57	17,52	20,83	24,70	30,55
40	Q. La Chorrera - El Molino	23,76	32,08	39,16	48,70	56,08	63,52	71,62	82,30
41	Q. La Paulita	7,15	11,21	14,76	19,42	22,96	26,53	30,16	35,26
42	Q. La Moñonga	11,54	15,60	19,34	25,01	29,83	35,11	41,28	50,36
43	Q. La Bermejala	17,45	22,88	27,44	33,64	38,49	43,44	48,86	56,19
44	Q. La Leonarda	7,53	11,06	14,26	18,76	22,22	25,64	29,78	35,14
45	Q. La Guayaba	0,09	0,21	0,34	0,53	0,70	0,89	1,09	1,38
46	Q. La Larga	18,26	24,76	31,08	39,69	46,79	53,96	62,07	72,99
47	Q. Agua Fría	1,93	3,18	4,38	6,18	7,62	9,11	10,96	13,42
48	Q. La Despensa	6,58	9,79	12,79	16,86	20,27	23,71	27,67	32,94
49	Q. La Honda	13,01	17,92	22,18	27,96	32,44	36,99	41,95	48,50
50	Q. Minitas	3,35	4,73	6,08	8,36	10,55	13,21	16,44	21,72
51	Q. La Cañada	0,51	0,84	1,14	1,54	1,85	2,17	2,50	2,95
52	Q. La Arenera	3,66	5,48	7,19	9,90	12,34	15,17	18,57	23,83
53	Q. La García	2,13	3,54	4,84	6,78	8,32	9,86	11,76	14,30
54	Q. La Zorrita	0,40	0,75	1,09	1,59	2,00	2,43	2,93	3,61
55	Q. La Potrera	1,91	3,16	4,31	5,94	7,25	8,57	10,14	12,19
56	Q. La Mauala	2,75	4,03	5,15	6,63	7,81	8,98	10,28	11,98
57	Q. La Manguala	15,47	20,90	26,03	32,82	38,32	43,76	49,95	58,22
58	Q. La Rafita	1,62	2,35	3,00	3,90	4,60	5,31	6,10	7,15
59	Q. La Candela	5,17	7,74	10,18	13,48	16,20	18,97	22,19	26,50
60	Q. El Rosario	8,71	12,95	16,84	22,30	26,71	31,47	36,81	44,12

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 45. Caudales máximos (m^3/s) estimados para las cuencas priorizadas por el método de NRCS

ID	Cuenca	TR2	TR5	TR10	TR25	TR50	TR100	TR200	TR500
1	Q. Santa Elena	47,10	67,19	85,63	112,03	133,88	157,61	183,89	221,69
2	Q. La Picacha	26,19	35,02	43,02	54,49	63,77	73,59	84,47	99,79
3	Q. La Iguaná	72,24	104,29	133,11	172,69	204,23	237,82	272,55	321,01
4	Q. Doña María	99,15	135,15	167,27	214,17	253,22	296,16	343,00	412,09
5	Q. La Presidenta	20,28	29,74	38,53	51,72	63,12	75,95	90,72	112,84
6	Q. La Poblada	28,51	40,53	51,76	69,14	84,59	102,36	123,19	154,89
7	Q. Ana Diaz	21,34	29,28	36,57	46,89	55,07	63,57	73,03	85,99

ID	Cuenca	TR2	TR5	TR10	TR25	TR50	TR100	TR200	TR500
8	Q. La Hondita	0,69	1,09	1,45	1,97	2,38	2,81	3,28	3,93
9	Q. La Hueso	59,34	79,93	98,22	123,61	143,77	164,97	187,83	219,64
10	Q. Potreritos	20,55	29,04	37,01	48,97	58,97	69,64	82,22	100,09
11	Q. La Volcana	2,41	4,10	5,66	7,79	9,46	11,17	12,94	15,49
12	Q. La Seca	11,18	15,60	19,27	24,64	28,83	33,02	37,59	43,65
13	Q. La Lejía	6,85	10,47	13,94	19,10	23,26	27,49	32,62	39,43
14	Q. La Escopetería	7,93	12,69	16,95	22,70	27,18	31,80	36,58	43,45
15	Q. La Sucia	95,30	132,96	168,14	223,01	272,06	328,70	394,10	495,52
16	Q. La Frisola	20,49	28,74	36,67	49,18	60,30	73,04	88,01	111,02
17	Q. La Aguacatala	14,17	22,03	29,07	38,46	45,72	53,18	61,17	71,78
18	Q. La Puerta - Borbollona	5,20	7,85	10,33	14,00	16,90	19,79	23,35	28,06
19	Q. El Ñato	5,28	8,78	12,01	16,62	20,41	24,51	29,04	35,31
20	Q. La Astillera	14,86	20,25	25,39	33,87	41,86	51,42	62,80	81,10
21	Q. Altavista	56,57	75,02	91,71	115,77	135,94	157,95	182,49	218,46
22	Q. Zúñiga	6,20	10,04	13,48	18,10	21,68	25,33	29,07	34,40
23	Q. El Hato - La Guayaba	1,63	2,69	3,67	5,13	6,30	7,46	8,93	10,87
24	Q. Cañaveral - El Zancudo	4,45	6,17	7,64	9,63	11,17	12,72	14,42	16,65
25	Q. La Gómez	4,17	6,17	7,98	10,65	12,81	15,02	17,71	21,40
26	Q. La Guayabala	15,38	20,80	25,85	32,70	38,27	43,91	50,21	58,66
27	Q. El Ahorcado	5,35	7,22	8,80	10,91	12,56	14,20	16,00	18,36
28	Q. la Rafita - Chorro Hondo	4,28	5,85	7,19	9,01	10,43	11,85	13,41	15,48
29	Q. La Limona	12,41	16,62	20,53	25,68	29,90	34,06	38,76	44,93
30	Q. Piedra Gorda	4,46	6,71	8,80	11,82	14,26	16,93	19,81	23,77
31	Q. Piedras Blancas	21,01	30,20	38,76	50,65	60,18	70,19	81,00	95,73
32	Q. Miserenga	13,34	19,67	25,79	35,53	44,39	54,86	67,14	86,44
33	Q. Malpaso	11,11	14,88	18,35	23,62	28,12	33,09	38,87	47,43
34	Q. La Puerta	5,96	9,18	12,22	16,69	20,27	23,87	28,31	34,14
35	Q. La Pelahueso	9,21	12,80	15,93	20,33	23,66	26,90	30,75	35,64
36	Q. La Madera	7,66	11,24	14,55	19,29	23,13	27,24	31,92	38,43
37	Q. La Castro	8,11	11,89	15,29	20,06	23,91	28,03	32,58	38,80
38	Q. La Cantera Ramal Sur	1,52	2,17	2,77	3,73	4,58	5,56	6,73	8,52
39	Q. La Quintana	5,66	7,66	9,49	12,32	14,78	17,53	20,77	25,63
40	Q. La Chorrera - El Molino	21,26	28,53	34,71	43,04	49,50	56,00	63,08	72,43
41	Q. La Paulita	6,37	9,89	12,96	17,01	20,09	23,18	26,34	30,79

ID	Cuenca	TR2	TR5	TR10	TR25	TR50	TR100	TR200	TR500
42	Q. La Moñonga	10,20	13,70	16,90	21,77	25,91	30,45	35,74	43,52
43	Q. La Bermejala	15,51	20,25	24,23	29,64	33,88	38,20	42,93	49,34
44	Q. La Leonarda	6,81	9,84	12,53	16,37	19,32	22,21	25,68	30,14
45	Q. La Guayaba	0,07	0,17	0,28	0,43	0,56	0,70	0,86	1,08
46	Q. La Larga	16,41	22,11	27,62	35,14	41,33	47,60	54,65	64,16
47	Q. Agua Fría	1,72	2,81	3,83	5,36	6,59	7,83	9,38	11,44
48	Q. La Despensa	5,86	8,57	11,11	14,52	17,34	20,18	23,48	27,86
49	Q. La Honda	11,64	15,97	19,64	24,66	28,56	32,51	36,83	42,53
50	Q. Minitas	2,79	3,93	5,03	6,90	8,68	10,85	13,49	17,80
51	Q. La Cañada	0,44	0,71	0,95	1,27	1,51	1,76	2,02	2,36
52	Q. La Arenera	3,14	4,64	6,05	8,30	10,31	12,60	15,38	19,65
53	Q. La García	1,90	3,10	4,21	5,82	7,11	8,39	9,97	12,05
54	Q. La Zorrita	0,34	0,63	0,91	1,31	1,64	1,99	2,38	2,92
55	Q. La Potrera	1,67	2,72	3,65	4,98	6,02	7,06	8,32	9,95
56	Q. La Mauala	2,45	3,51	4,44	5,64	6,59	7,54	8,60	9,99
57	Q. La Manguala	13,89	18,53	22,94	28,77	33,52	38,20	43,48	50,49
58	Q. La Rafita	1,41	2,04	2,59	3,35	3,94	4,54	5,21	6,10
59	Q. La Candela	4,61	6,81	8,85	11,62	13,91	16,20	18,86	22,41
60	Q. El Rosario	5,22	7,46	9,58	12,54	14,93	17,50	20,27	24,05

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 46. Caudales máximos (m^3/s) estimados para las cuencas priorizadas por el método de Williams y Hann

ID	Cuenca	TR2	TR5	TR10	TR25	TR50	TR100	TR200	TR500
1	Q. Santa Elena	89,18	128,42	164,40	216,24	258,87	305,79	357,46	431,77
2	Q. La Picacha	43,75	58,61	72,02	91,25	107,12	123,82	142,74	169,23
3	Q. La Iguaná	133,10	190,38	242,66	315,93	374,25	435,40	501,77	593,07
4	Q. Doña María	164,39	222,83	275,98	352,95	417,60	488,22	566,38	681,09
5	Q. La Presidenta	43,59	64,97	84,91	114,90	140,86	170,05	203,28	253,89
6	Q. La Poblada	61,97	89,08	114,47	153,73	188,71	229,61	277,26	350,92
7	Q. Ana Diaz	37,21	51,40	64,61	83,46	98,40	113,75	131,39	155,32
8	Q. La Hondita	2,20	3,37	4,48	6,01	7,22	8,50	9,92	11,85
9	Q. La Hueso	105,12	141,22	173,37	218,54	254,34	291,55	332,96	390,26
10	Q. Potreritos	41,57	60,54	78,51	105,41	127,71	151,41	179,76	219,90
11	Q. La Volcana	5,79	10,02	13,94	19,29	23,49	27,91	32,51	39,00

ID	Cuenca	TR2	TR5	TR10	TR25	TR50	TR100	TR200	TR500
12	Q. La Seca	22,95	32,90	41,17	53,16	62,68	72,19	82,59	96,38
13	Q. La Lejía	14,63	22,94	31,05	43,04	52,61	62,35	74,55	90,70
14	Q. La Escopetería	17,01	27,72	37,52	50,80	61,17	71,82	82,88	98,62
15	Q. La Sucia	192,28	268,68	340,42	452,81	553,32	669,41	805,95	1019,74
16	Q. La Frisola	40,84	58,10	74,53	100,51	123,61	149,98	181,38	229,51
17	Q. La Aguacatala	27,30	43,41	57,88	77,26	92,32	107,95	124,35	146,99
18	Q. La Puerta - Borbollona	10,31	15,78	21,02	28,67	34,72	40,75	48,18	58,20
19	Q. El Ñato	10,21	16,99	23,48	32,82	40,53	49,10	58,59	71,71
20	Q. La Astillera	28,59	39,21	49,35	66,18	81,98	100,92	123,49	159,84
21	Q. Altavista	99,64	132,02	161,52	203,95	239,74	278,55	322,26	386,26
22	Q. Zúñiga	11,12	18,11	24,41	32,89	39,53	46,29	53,21	63,09
23	Q. El Hato - La Guayaba	3,26	5,34	7,33	10,26	12,67	15,11	18,20	22,30
24	Q. Cañaveral - El Zancudo	9,40	13,16	16,38	20,72	24,11	27,58	31,35	36,33
25	Q. La Gómez	7,63	11,57	15,16	20,50	24,89	29,43	34,89	42,37
26	Q. La Guayabala	26,33	36,26	45,53	57,93	68,01	78,16	89,63	105,39
27	Q. El Ahorcado	9,85	13,38	16,36	20,44	23,60	26,77	30,21	34,75
28	Q. la Rafita - Chorro Hondo	8,76	12,11	14,99	18,99	22,09	25,24	28,68	33,23
29	Q. La Limona	23,71	32,48	40,56	51,47	60,43	69,29	79,33	92,50
30	Q. Piedra Gorda	4,23	6,36	8,33	11,14	13,44	15,96	18,67	22,41
31	Q. Piedras Blancas	16,33	23,34	29,85	38,93	46,21	53,84	62,08	73,30
32	Q. Miserenga	29,46	43,86	57,97	80,59	101,56	126,45	155,79	202,14
33	Q. Malpaso	20,26	27,44	33,98	44,09	52,74	62,29	73,46	89,99
34	Q. La Puerta	11,60	17,99	24,11	33,09	40,28	47,51	56,80	69,08
35	Q. La Pelahueso	14,72	20,75	26,08	33,51	39,26	44,84	51,45	59,87
36	Q. La Madera	13,82	20,37	26,38	35,27	42,58	50,38	59,28	71,65
37	Q. La Castro	15,46	23,11	29,97	39,55	47,29	55,69	64,97	77,66
38	Q. La Cantera Ramal Sur	2,99	4,31	5,55	7,51	9,27	11,29	13,69	17,40
39	Q. La Quintana	10,25	14,05	17,49	22,80	27,43	32,61	38,70	47,86
40	Q. La Chorrera - El Molino	41,48	56,49	69,18	86,23	99,39	113,06	127,95	147,64
41	Q. La Paulita	11,10	17,48	23,02	30,29	35,88	41,55	47,32	55,45
42	Q. La Moñonga	20,72	28,48	35,56	46,26	55,37	65,39	77,09	94,34
43	Q. La Bermejala	32,89	43,17	51,90	63,76	73,03	82,48	92,95	107,36
44	Q. La Leonarda	11,13	16,27	20,89	27,52	32,68	37,73	43,79	51,58
45	Q. La Guayaba	0,25	0,57	0,89	1,38	1,79	2,26	2,77	3,50

ID	Cuenca	TR2	TR5	TR10	TR25	TR50	TR100	TR200	TR500
46	Q. La Larga	28,72	39,42	49,66	63,49	74,92	86,43	99,74	117,91
47	Q. Agua Fría	2,99	4,85	6,62	9,31	11,49	13,67	16,43	20,14
48	Q. La Despensa	11,74	17,38	22,69	29,94	35,98	42,03	49,22	58,88
49	Q. La Honda	23,49	32,75	40,64	51,52	60,09	68,80	78,29	90,84
50	Q. Minitas	5,55	7,82	10,03	13,82	17,45	21,88	27,24	36,05
51	Q. La Cañada	0,95	1,53	2,04	2,72	3,23	3,77	4,34	5,09
52	Q. La Arenera	7,16	10,87	14,41	20,04	25,08	30,89	37,86	48,62
53	Q. La García	4,15	6,77	9,23	12,93	15,86	18,80	22,40	27,12
54	Q. La Zorrita	0,97	1,77	2,53	3,64	4,57	5,56	6,70	8,27
55	Q. La Potrera	3,62	5,85	7,95	10,98	13,39	15,87	18,84	22,78
56	Q. La Mauala	3,81	5,49	6,95	8,89	10,42	11,92	13,64	15,89
57	Q. La Manguala	26,60	36,08	45,07	56,87	66,81	76,71	87,93	102,70
58	Q. La Rafita	3,19	4,60	5,84	7,55	8,91	10,30	11,81	13,83
59	Q. La Candela	8,50	12,60	16,43	21,68	26,10	30,61	35,81	42,75
60	Q. El Rosario	4,82	6,89	8,82	11,51	13,69	16,06	18,61	22,10

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 47. Caudales máximos (m^3/s) estimados para las cuencas priorizadas por el método de Clark

ID	Cuenca	TR2	TR5	TR10	TR25	TR50	TR100	TR200	TR500
1	Q. Santa Elena	104,92	149,44	190,28	248,76	297,25	350,39	409,25	493,94
2	Q. La Picacha	46,07	61,56	75,64	95,65	111,84	128,97	147,95	174,65
3	Q. La Iguaná	189,26	273,00	348,31	451,63	534,24	622,26	713,28	840,32
4	Q. Doña María	271,33	369,75	457,69	585,19	691,12	807,64	935,26	1123,68
5	Q. La Presidenta	23,20	33,95	43,99	59,10	72,16	86,85	103,75	129,11
6	Q. La Poblada	38,93	55,35	70,68	94,41	115,49	139,72	168,12	211,50
7	Q. Ana Diaz	34,81	47,63	59,38	76,01	89,31	103,12	118,53	139,61
8	Q. La Hondita	0,27	0,42	0,56	0,76	0,92	1,08	1,26	1,51
9	Q. La Hueso	123,37	165,84	203,62	256,11	297,80	341,68	388,92	454,70
10	Q. Potreritos	23,91	33,65	42,84	56,71	68,19	80,44	94,89	115,44
11	Q. La Volcana	1,41	2,40	3,30	4,54	5,52	6,52	7,55	9,04
12	Q. La Seca	10,81	15,05	18,56	23,77	27,79	31,80	36,18	41,99
13	Q. La Lejía	6,32	9,63	12,80	17,53	21,31	25,14	29,82	36,06
14	Q. La Escopetería	5,36	8,56	11,44	15,32	18,34	21,45	24,67	29,32
15	Q. La Sucia	252,51	351,85	444,61	589,65	719,55	869,60	1042,89	1311,78

ID	Cuenca	TR2	TR5	TR10	TR25	TR50	TR100	TR200	TR500
16	Q. La Frisola	31,78	44,59	56,83	76,10	93,22	112,82	135,92	171,53
17	Q. La Aguacatala	15,17	23,59	31,13	41,20	49,05	57,05	65,61	77,03
18	Q. La Puerta - Borbollona	4,32	6,50	8,54	11,55	13,93	16,31	19,25	23,11
19	Q. El Ñato	3,75	6,22	8,51	11,75	14,41	17,32	20,53	24,96
20	Q. La Astillera	18,70	25,48	31,93	42,61	52,64	64,65	78,94	101,91
21	Q. Altavista	119,03	157,61	192,53	243,01	285,62	332,12	384,05	459,79
22	Q. Zúñiga	4,29	6,93	9,32	12,51	14,97	17,48	20,07	23,76
23	Q. El Hato - La Guayaba	1,03	1,69	2,31	3,22	3,95	4,69	5,60	6,81
24	Q. Cañaveral - El Zancudo	2,74	3,79	4,68	5,91	6,85	7,80	8,84	10,21
25	Q. La Gómez	2,95	4,35	5,62	7,49	9,00	10,56	12,46	15,04
26	Q. La Guayabala	17,18	23,20	28,82	36,38	42,59	48,85	55,86	65,28
27	Q. El Ahorcado	3,69	4,99	6,07	7,54	8,66	9,79	11,02	12,65
28	Q. la Rafita - Chorro Hondo	2,83	3,86	4,75	5,95	6,88	7,81	8,84	10,20
29	Q. La Limona	11,62	15,51	19,16	23,95	27,85	31,71	36,10	41,86
30	Q. Piedra Gorda	5,73	8,60	11,28	15,12	18,22	21,61	25,31	30,40
31	Q. Piedras Blancas	49,66	71,31	91,40	119,28	141,65	165,13	190,76	225,83
32	Q. Miserenga	16,80	24,75	32,46	44,67	55,77	68,89	84,27	108,43
33	Q. Malpaso	11,33	15,16	18,68	24,03	28,60	33,63	39,51	48,19
34	Q. La Puerta	4,68	7,19	9,54	13,03	15,81	18,58	22,02	26,57
35	Q. La Pelahueso	7,64	10,58	13,15	16,77	19,50	22,14	25,30	29,35
36	Q. La Madera	7,16	10,49	13,55	17,96	21,54	25,36	29,70	35,72
37	Q. La Castro	8,09	11,84	15,21	19,93	23,78	27,88	32,39	38,55
38	Q. La Cantera Ramal Sur	0,84	1,20	1,53	2,06	2,53	3,07	3,72	4,72
39	Q. La Quintana	4,32	5,84	7,24	9,39	11,27	13,37	15,84	19,56
40	Q. La Chorrera - El Molino	21,47	28,80	35,01	43,39	49,87	56,41	63,52	72,91
41	Q. La Paulita	4,40	6,83	8,95	11,73	13,86	16,01	18,19	21,28
42	Q. La Moñonga	10,40	13,95	17,21	22,15	26,35	30,95	36,33	44,22
43	Q. La Bermejala	15,20	19,82	23,69	28,96	33,08	37,31	41,95	48,24
44	Q. La Leonarda	5,24	7,53	9,59	12,49	14,75	16,94	19,60	23,00
45	Q. La Guayaba	0,03	0,06	0,10	0,15	0,20	0,25	0,31	0,38
46	Q. La Larga	19,82	26,67	33,26	42,21	49,63	57,18	65,69	77,16
47	Q. Agua Fría	1,17	1,90	2,59	3,61	4,44	5,27	6,31	7,68
48	Q. La Despensa	3,97	5,80	7,50	9,79	11,69	13,60	15,82	18,77
49	Q. La Honda	10,17	13,95	17,15	21,50	24,90	28,35	32,11	37,08

ID	Cuenca	TR2	TR5	TR10	TR25	TR50	TR100	TR200	TR500
50	Q. Minitas	1,62	2,28	2,93	4,01	5,05	6,31	7,84	10,35
51	Q. La Cañada	0,16	0,26	0,35	0,47	0,55	0,65	0,74	0,87
52	Q. La Arenera	1,83	2,70	3,52	4,83	5,99	7,33	8,95	11,43
53	Q. La García	1,15	1,86	2,52	3,48	4,25	5,01	5,95	7,19
54	Q. La Zorrita	0,14	0,25	0,37	0,53	0,66	0,80	0,95	1,17
55	Q. La Potrera	0,93	1,50	2,02	2,75	3,33	3,89	4,58	5,49
56	Q. La Mauala	1,40	2,00	2,52	3,20	3,74	4,28	4,89	5,67
57	Q. La Manguala	14,03	18,69	23,11	28,93	33,68	38,42	43,78	50,83
58	Q. La Rafita	0,69	0,99	1,26	1,63	1,91	2,21	2,53	2,96
59	Q. La Candela	3,06	4,50	5,84	7,66	9,17	10,68	12,44	14,79
60	Q. El Rosario	8,68	12,41	15,86	20,76	24,74	29,01	33,62	39,90

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 48. Caudales máximos (m^3/s) estimados para las cuencas priorizadas por el método de Racional

ID	Cuenca	TR2	TR5	TR10	TR25	TR50	TR100	TR200	TR500
1	Q. Santa Elena	116,28	152,64	186,17	237,50	281,57	332,66	396,15	496,34
2	Q. La Picacha	58,13	69,93	80,22	95,40	106,88	119,88	134,54	158,55
3	Q. La Iguaná	171,60	207,64	250,38	305,79	348,78	393,51	436,69	511,88
4	Q. Doña María	261,05	307,17	346,52	408,10	467,75	534,84	610,24	724,32
5	Q. La Presidenta	47,12	63,31	77,39	97,45	114,09	132,30	157,76	198,02
6	Q. La Poblada	61,60	80,86	97,79	122,74	144,02	169,66	201,21	250,87
7	Q. Ana Diaz	51,06	61,93	71,31	85,31	97,16	110,38	125,30	148,93
8	Q. La Hondita	5,24	6,77	8,46	11,77	14,91	18,71	23,27	30,72
9	Q. La Hueso	119,25	142,43	164,65	196,07	219,54	243,48	271,53	318,59
10	Q. Potreritos	73,81	89,33	102,80	123,19	140,79	160,49	182,52	217,05
11	Q. La Volcana	7,88	11,96	15,40	19,82	23,13	26,43	30,35	38,80
12	Q. La Seca	30,00	39,11	47,53	60,98	73,24	87,61	104,44	131,15
13	Q. La Lejía	32,16	41,44	49,78	62,81	74,38	87,64	102,78	126,06
14	Q. La Escopetería	21,09	30,43	38,24	48,27	55,82	63,39	72,30	91,49
15	Q. La Sucia	263,87	312,06	356,05	421,17	496,30	581,61	677,40	828,06
16	Q. La Frisola	75,62	89,83	101,98	120,14	135,63	152,78	173,62	212,35
17	Q. La Aguacatala	31,59	44,32	54,95	68,46	78,54	88,56	105,44	133,97
18	Q. La Puerta - Borbollona	24,31	30,65	36,26	44,91	52,51	61,14	70,90	85,77
19	Q. El Ñato	23,69	34,63	45,28	63,20	80,23	100,83	125,62	166,08

ID	Cuenca	TR2	TR5	TR10	TR25	TR50	TR100	TR200	TR500
20	Q. La Astillera	62,16	71,47	79,25	90,60	100,06	110,33	121,49	143,60
21	Q. Altavista	122,37	147,85	169,96	202,46	230,43	261,52	296,42	350,87
22	Q. Zúñiga	16,58	24,14	30,45	38,50	44,49	50,45	57,51	72,98
23	Q. El Hato - La Guayaba	11,66	14,85	17,71	22,13	26,03	30,47	35,51	43,21
24	Q. Cañaveral - El Zancudo	14,05	18,76	23,15	30,27	36,84	44,65	53,89	68,76
25	Q. La Gómez	18,75	23,30	27,25	33,11	38,10	43,63	50,28	60,88
26	Q. La Guayabala	45,24	55,08	63,53	75,96	86,47	98,06	111,82	132,77
27	Q. El Ahorcado	14,37	19,04	23,39	30,43	36,92	44,62	53,75	68,46
28	Q. la Rafita - Chorro Hondo	12,43	16,64	20,55	26,92	32,81	39,80	48,10	61,46
29	Q. La Limona	41,43	49,49	56,42	66,85	75,80	85,79	96,90	113,55
30	Q. Piedra Gorda	14,26	20,10	25,90	35,55	44,64	55,56	68,62	89,79
31	Q. Piedras Blancas	60,25	79,13	97,01	132,25	166,03	206,52	255,36	334,64
32	Q. Miserenga	64,65	79,30	92,27	112,34	130,08	150,35	173,52	214,59
33	Q. Malpaso	31,13	38,31	44,33	52,53	59,04	65,89	73,32	90,11
34	Q. La Puerta	30,91	39,22	46,60	58,03	68,09	79,54	92,51	112,30
35	Q. La Pelahueso	27,79	33,32	38,11	45,35	51,61	58,62	66,48	78,33
36	Q. La Madera	27,79	35,67	42,70	53,46	62,92	73,72	86,29	107,62
37	Q. La Castro	25,05	35,47	45,44	61,97	77,52	96,18	118,51	154,72
38	Q. La Cantera Ramal Sur	6,63	8,40	9,97	12,40	14,55	17,00	19,78	24,04
39	Q. La Quintana	17,84	22,18	25,82	30,71	34,56	38,56	44,08	54,69
40	Q. La Chorrera - El Molino	48,52	64,29	78,93	102,62	124,46	150,34	181,00	230,53
41	Q. La Paulita	14,87	21,05	26,17	32,65	37,46	42,23	47,88	60,22
42	Q. La Moñonga	28,70	35,31	40,86	48,45	54,52	60,93	67,89	83,29
43	Q. La Bermejala	32,55	42,05	50,72	64,39	76,77	91,27	108,35	136,97
44	Q. La Leonarda	25,73	31,27	36,10	43,44	49,80	56,94	64,97	77,09
45	Q. La Guayaba	2,41	3,06	3,64	4,53	5,32	6,22	7,24	8,79
46	Q. La Larga	56,84	68,73	79,02	94,56	107,96	122,93	139,64	164,90
47	Q. Agua Fría	11,63	14,94	17,91	22,53	26,62	31,29	36,60	44,73
48	Q. La Despensa	33,03	40,34	46,70	56,35	64,70	74,05	84,51	100,26
49	Q. La Honda	30,18	40,50	50,14	65,81	80,32	97,56	118,02	150,99
50	Q. Minitas	20,55	23,93	26,77	30,93	34,42	38,22	42,37	48,41
51	Q. La Cañada	4,75	5,57	6,27	7,32	8,22	9,21	10,32	11,98
52	Q. La Arenera	22,39	26,62	30,24	35,66	40,28	45,40	51,07	59,49
53	Q. La García	13,29	16,70	19,71	24,35	28,43	33,04	38,26	46,20

ID	Cuenca	TR2	TR5	TR10	TR25	TR50	TR100	TR200	TR500
54	Q. La Zorrita	6,44	7,94	9,26	11,26	13,00	14,96	17,16	20,47
55	Q. La Potrera	11,42	14,08	16,41	19,97	23,07	26,57	30,51	36,47
56	Q. La Mauala	11,91	14,09	15,96	18,77	21,17	23,85	26,83	31,28
57	Q. La Manguala	45,69	54,73	62,53	74,26	84,35	95,59	108,13	126,91
58	Q. La Rafita	5,86	8,12	10,25	13,77	17,05	20,98	25,66	33,23
59	Q. La Candela	27,17	33,23	38,51	46,53	53,46	61,24	69,95	83,05
60	Q. El Rosario	13,98	19,31	24,95	34,36	43,24	53,94	66,76	87,61

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

9 ESTUDIO HIDRÁULICO

En este capítulo se presenta el análisis hidráulico de las corrientes principales que conforman la red hídrica del distrito de Medellín y que, de acuerdo con la geomorfología, cuentan con características y depósitos de avenidas torrenciales e inundaciones. En este proceso, se ha realizado la priorización de un total de 60 cuencas localizadas al interior del territorio para lo cual se desarrollan diferentes modelos hidráulicos que permitan el análisis de cada una de las corrientes. Para cada uno estos modelos se evaluaron las condiciones hidráulicas de profundidad y velocidad de flujo generada por los eventos de inundación con un período de retorno de 100 años tal como lo recomienda el documento: Guía Metodológica para la Elaboración de Mapas de Inundación, IDEAM, 2017.

Por otra parte, para los eventos torrenciales se evaluaron los caudales máximos asociados a los períodos de retorno de 50, 200 y 500 años mayorados en un porcentaje del 40% con el fin de considerar un incremento en el volumen asociado a la carga por arrastre y suspensión, siguiendo los lineamientos propuestos en la Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales, desarrollada por el Servicio Geológico Colombiano y la Pontificia Universidad Javeriana, (SGC, 2021). Allí se propone el uso de una matriz de clasificación eventos con base en la intensidad (función de la profundidad y velocidad de flujo) y la frecuencia (función del período de retorno) del evento. La implementación de los modelos hidráulicos bidimensionales (2D) se realizó mediante la implementación del software HEC RAS V6.7 Beta3.

Con el objetivo de realizar un análisis hidráulico ajustado a las condiciones precisas de cada tramo de interés se tuvieron en cuenta diferentes condiciones evidenciadas en registros históricos, recorridos de campo, y fotografías aéreas, entre otros. Con respecto a la escala espacial de trabajo, para el Distrito de Medellín se tuvo como base la disponibilidad de información topográfica a partir de un modelo digital del terreno desarrollado con tecnología LiDAR y para una resolución de 1 m por 1 m, este ráster fue remuestreado a 2 m x 2 m contando con una escala de 1:2.000 ~~más precisa~~ como cumplimiento a las escalas de trabajo definidas en el Decreto 1807 de 2014, integrado en el Decreto 1077 de 2015, para los estudios básicos de amenaza por inundación y avenidas torrenciales.

9.1 ESCENARIOS HIDROLÓGICOS

Como se describió en el estudio hidrológico se tiene una serie de información de precipitación para diferentes escenarios hidrológicos, seleccionando el escenario más crítico que corresponde a la envolvente máxima de las intensidades estimadas para cada una de las estaciones con información de IDF.

9.2 INFORMACIÓN UTILIZADA

9.2.1 Información Topográfica

La información topográfica utilizada corresponde al MDE con resolución de píxel de 1 m x 1 m el cual corresponde a información básica suministrada por el distrito de Medellín, con el cual se plantea el desarrollo de los modelos hidráulicos de las corrientes priorizadas, con una escala aproximada de 1:21.000. Cumpliendo así con los lineamientos definidos en el decreto 1807 de 2014 para la escala de trabajo. Se tiene en cuenta que, para adelantar el análisis hidráulico de estas corrientes, se utiliza el software HEC RAS en su versión 6.7 Beta 3, la cual permite analizar el comportamiento del flujo en dos dimensiones – 2D. Este tipo de modelos y su consideración física, es basada en una superficie o terreno de referencia por lo cual, no se requiere el ingreso de secciones transversales que definan la geometría del canal en cuanto al cauce, márgenes y pendiente en el lecho, toda vez que el modelo calcula el desplazamiento del agua a partir de las celdas que representan el terreno o modelo digital de elevación. En la Ilustración 168, se presenta de forma general, la información asociada a la superficie del terreno implementada dentro de la modelación hidráulica de los drenajes de interés.

El modelo digital de elevación o terreno es elaborado a partir de un levantamiento LIDAR, contando con la respectiva superficie, TIN o Malla, que se convierta a formato ráster – ASCII con una resolución definida, bastante detallada para las condiciones del canal estudio, pendiente y longitud de este. Ahora, con el fin de representar los resultados de forma gráfica y en algún sitio en particular, se generaron secciones transversales a lo largo del tramo estudiado. En la Ilustración 169, se presenta el esquema con las secciones transversales elaboradas para la representación gráfica de los niveles obtenidos en la modelación hidráulica.

Es de indicar que las secciones consisten en puntos donde se podrán revisar en detalle los resultados gráficos arrojados por el modelo 2D, y no representan la geometría específica del modelo para el desarrollo de los resultados, ya que estos se calculan a partir de la superficie o terreno. Considerando el modelo utilizado, el cual resuelve ecuaciones en 2 dimensiones – 2D, y que desarrolla el comportamiento hidráulico de la corriente a partir de la superficie o terreno, el espaciamiento entre secciones transversales no condiciona los resultados, secciones que únicamente son utilizada para visualizar los resultados hidráulicos del flujo a lo largo del canal, y no corresponden a la base de geometría en el modelo. Por ello, no se requiere evaluar el espaciamiento entre las secciones enfocado a la minimización de errores en los cálculos, toda vez que el modelo permite el cálculo del tránsito hidráulico en cada uno de los pixeles que componen la malla.

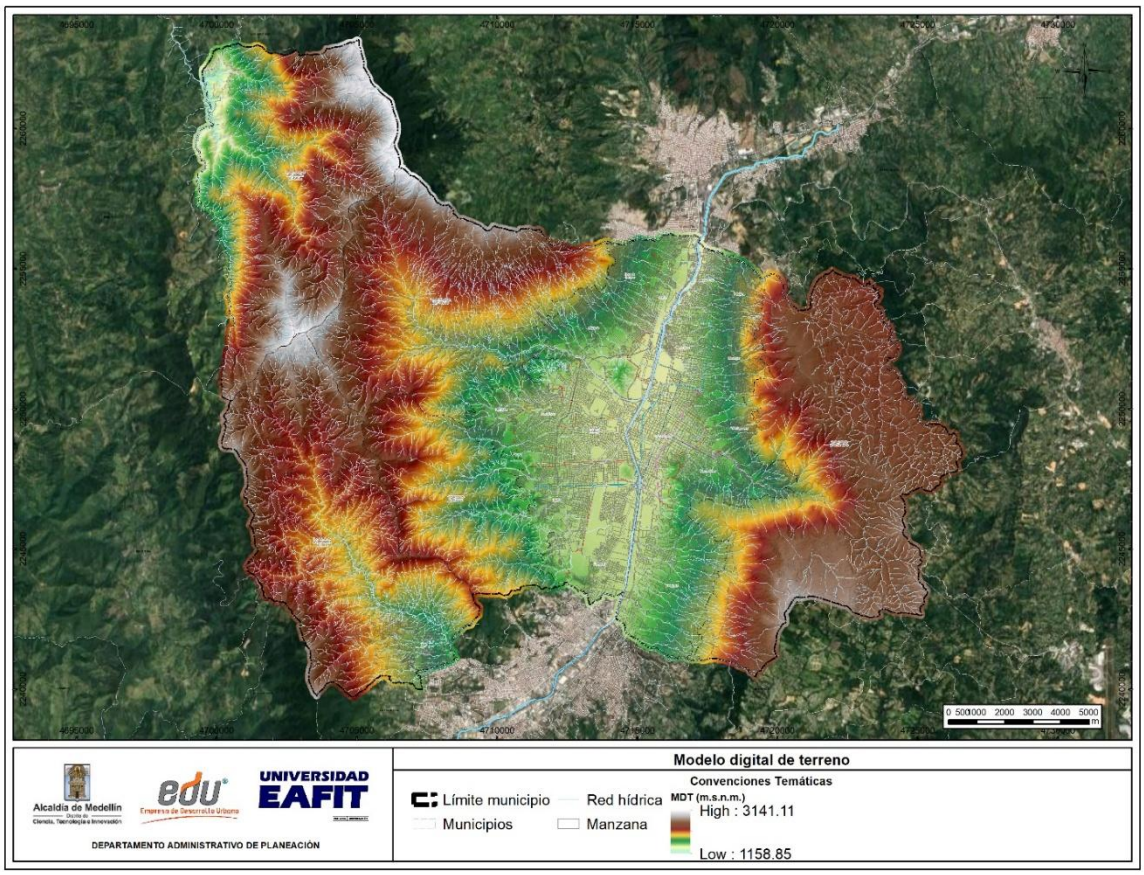


Ilustración 168. Superficie del terreno utilizada en modelación hidráulica (LIDAR 1 m x 1 m)

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Para completar la geometría del modelo hidráulico, se delimita el área 2D trazada en la totalidad del terreno disponible contando con tamaño de píxel definido previamente. Ahora, el modelo requiere establecer el tamaño de la malla que utilizará dentro de los cálculos escogiendo los valores de la malla en dx y dy. Esta información es refinada en zonas donde se requiere mayor detalle, tales como bancas, muros, obras, taludes o terrazas, entre otros, donde se utilizan líneas de quiebre o *breaklines* que permiten aplicar un refinamiento de la malla utilizando un dx y dy mínimo y máximo, o mediante la herramienta de refinar región, permitiendo establecer un mayor detalle de la malla en estas áreas.

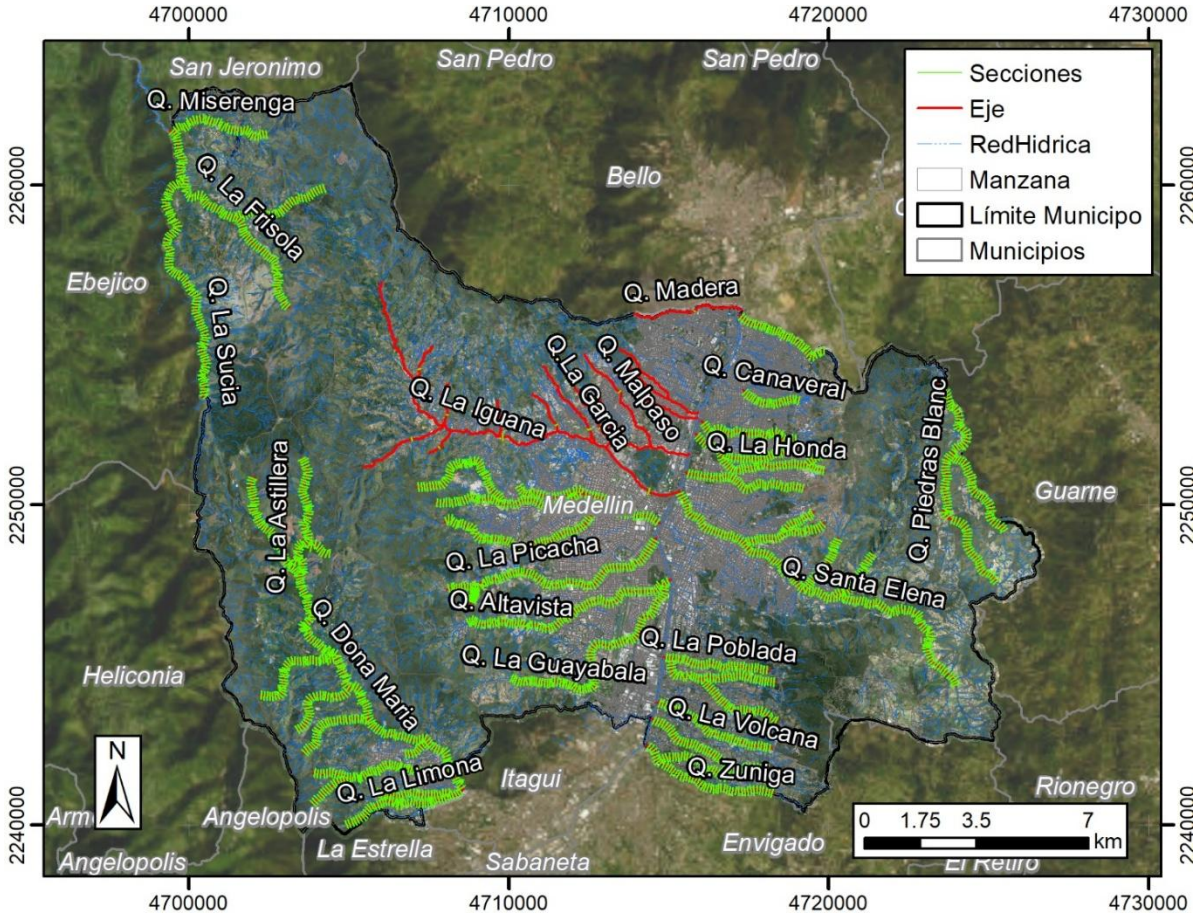


Ilustración 169. Secciones transversales en modelación hidráulica

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

En la Tabla 49, se presenta el resumen del tamaño de malla usado en la modelación hidráulica, la cual se ha definido para los diferentes modelos hidráulicos elaborados. Es importante indicar que según la distribución de los drenajes priorizados para el análisis (60 cuencas), se ha elaborado un total de 14 modelos hidráulicos, tal y como se irá describiendo a través del presente documento.

Tabla 49. Tamaño malla utilizada en el modelo 2D.

ID	Corriente	Modelo	dx y dy Malla	dx y dy Refinado	N Celdas
1	Q. Santa Elena	Modelo 5	5 m	2 m	69,971
2	Q. La Picacha	Modelo 11	5 m	2 m	51,817
3	Q. La Iguana	Modelo 14	4 m	4 m	567,563
4	Q. Doña María	Modelo 1	6 m	2 m	107,975
5	Q. La Presidenta	Modelo 4	5 m	2 m	48,740
6	Q. La Poblada	Modelo 4	5 m	2 m	48,740
7	Q. Ana Diaz	Modelo 10	5 m	2 m	39,634
8	Q. La Hondita	Modelo 7	5 m	2 m	30,991
9	Q. La Hueso	Modelo 9	5 m	2 m	72,935

ID	Corriente	Modelo	dx y dy Malla	dx y dy Refinado	N Celdas
10	Q. Potreritos	Modelo 14	4 m	4 m	567,563
11	Q. La Volcana	Modelo 7	5 m	2 m	19,552
12	Q. La Seca	Modelo 7	5 m	2 m	20,543
13	Q. La Lejia	Modelo 13	5 m	2 m	95,297
14	Q. La Escopetería	Modelo 4	5 m	2 m	48,740
15	Q. La Sucia	Modelo 13	5 m	2 m	95,297
16	Q. La Frisola	Modelo 13	5 m	2 m	95,297
17	Q. La Aguacatala	Modelo 7	5 m	2 m	20,891
18	Q. La Puerta - Borbollona	Modelo 14	4 m	4 m	567,563
19	Q. El Ñato	Modelo 6	5 m	2 m	80,157
20	Q. La Astillera	Modelo 1	6 m	2 m	107,975
21	Q. Altavista	Modelo 12	5 m	2 m	87,348
22	Q. Zuñiga	Modelo 7	5 m	2 m	35,110
23	Q. El Hato - La Guayaba	Modelo 14	4 m	4 m	567,563
24	Q. Canaveral - El Zancudo	Modelo 7	5 m	2 m	7,130
25	Q. La Gómez	Modelo 14	4 m	4 m	567,563
26	Q. La Guayabala	Modelo 12	5 m	2 m	87,348
27	Q. El Ahorcado	Modelo 7	5 m	2 m	30,991
28	Q. la Rafita - Chorro Hondo	Modelo 6	5 m	2 m	80,157
29	Q. La Limona	Modelo 3	6 m	2 m	94,204
30	Q. Piedra Gorda	Modelo 8	5 m	2 m	45,902
31	Q. Piedras Blancas	Modelo 8	5 m	2 m	45,902
32	Q. Miserenga	Modelo 13	5 m	2 m	95,297
33	Q. Malpaso	Modelo 14	4 m	4 m	222,582
34	Q. La Puerta	Modelo 14	4 m	4 m	567,563
35	Q. La Pelahueso	Modelo 9	5 m	2 m	72,935
36	Q. La Madera	Modelo 14	2 m	2 m	221,538
37	Q. La Castro	Modelo 6	5 m	2 m	80,157
38	Q. La Cantera Ramal Sur	Modelo 14	2 m	2 m	288,486
39	Q. La Quintana	Modelo 14	4 m	4 m	108,192
40	Q. La Chorrera - El Molino	Modelo 7	5 m	2 m	30,991
41	Q. La Paulita	Modelo 7	5 m	2 m	35,110
42	Q. La Moñonga	Modelo 14	4 m	4 m	222,582
43	Q. La Bermejala	Modelo 7	5 m	2 m	14,342
44	Q. La Leonarda	Modelo 9	5 m	2 m	72,935
45	Q. La Guayaba	Modelo 11	5 m	2 m	51,817
46	Q. La Larga	Modelo 2	5 m	2 m	70,512
47	Q. Agua Fria	Modelo 14	4 m	4 m	567,563
48	Q. La Despensa	Modelo 2	5 m	2 m	70,512
49	Q. La Honda	Modelo 7	5 m	2 m	30,991
50	Q. Minitas	Modelo 1	6 m	2 m	107,975
51	Q. La Cañada	Modelo 3	6 m	2 m	94,204

ID	Corriente	Modelo	dx y dy Malla	dx y dy Refinado	N Celdas
52	Q. La Arenera	Modelo 14	4 m	4 m	567,563
53	Q. La García	Modelo 14	4 m	4 m	567,563
54	Q. La Zorrita	Modelo 3	6 m	2 m	94,204
55	Q. La Potrera	Modelo 14	4 m	4 m	567,563
56	Q. La Mauala	Modelo 3	6 m	2 m	94,204
57	Q. La Manguala	Modelo 3	6 m	2 m	94,204
58	Q. La Rafita	Modelo 6	5 m	2 m	80,157
59	Q. La Candela	Modelo 2	5 m	2 m	70,512
60	Q. El Rosario	Modelo 8	5 m	2 m	45,902

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

9.2.2 Información Hidrológica (Caudales de Diseño)

Los caudales de diseño corresponden a los estimados en el capítulo de hidrología, donde se muestran los resultados obtenidos luego de implementar metodologías de hidrógrafas unitarias sintéticas y el método racional, escogiendo como caudales de diseño al promedio de los caudales que se encontraban más cerca entre sí (banda de confianza centrada en la mediana con un ancho de 1 IQR). Los caudales fueron calculados para los periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años. En la Tabla 50, se presentan los caudales para los diferentes periodos de retorno en cada una de las cuencas de interés.

Tabla 50. Caudales máximos implementados en modelación hidráulica.

ID	Cuenca	Periodo de Retorno							
		2	5	10	25	50	100	200	500
1	Q. Santa Elena	58,52	83,67	107,16	140,91	168,77	199,25	232,92	281,38
2	Q. La Picacha	34,06	45,83	56,42	71,49	83,65	96,52	111,20	131,84
3	Q. La Iguaná	124,09	175,80	220,80	281,08	327,71	375,89	426,29	494,87
4	Q. Doña María	122,34	166,46	206,13	263,54	311,47	363,98	421,62	506,40
5	Q. La Presidenta	22,81	33,64	43,72	58,86	71,96	86,70	103,61	129,08
6	Q. La Poblada	33,36	47,63	61,05	81,85	100,36	121,66	146,56	184,68
7	Q. Ana Diaz	23,47	32,30	40,40	51,89	60,99	70,40	81,00	95,62
8	Q. La Hondita	5,24	6,77	8,46	11,77	14,91	18,71	23,27	30,72
9	Q. La Hueso	70,94	95,49	117,26	147,61	171,68	197,03	225,07	263,98
10	Q. Potreritos	31,62	44,83	57,08	74,92	89,29	104,28	121,53	145,44
11	Q. La Volcana	7,88	11,96	15,40	19,82	23,13	26,43	30,35	38,80
12	Q. La Seca	12,34	17,41	21,62	27,82	32,67	37,51	42,80	49,82
13	Q. La Lejía	7,55	11,66	15,58	21,51	26,25	31,07	36,94	44,77
14	Q. La Escopetería	8,98	14,44	19,36	26,05	31,27	36,63	42,18	50,13
15	Q. La Sucia	117,01	163,48	207,00	275,03	335,87	406,16	487,56	613,77
16	Q. La Frisola	31,74	44,91	57,43	77,23	95,22	115,85	140,30	177,91

ID	Cuenca	Periodo de Retorno							
		2	5	10	25	50	100	200	500
17	Q. La Aguacatala	15,85	24,88	32,97	43,79	52,15	60,71	69,90	82,25
18	Q. La Puerta - Borbollona	7,02	10,76	14,21	19,21	23,12	27,03	31,70	37,71
19	Q. El Ñato	5,85	9,81	13,55	18,86	23,22	27,97	33,29	40,63
20	Q. La Astillera	16,62	22,68	28,50	38,15	47,21	58,06	70,98	91,78
21	Q. Altavista	102,28	137,10	169,01	215,02	253,80	295,97	343,47	412,70
22	Q. Zúñiga	6,98	11,36	15,34	20,69	24,83	29,04	33,37	39,50
23	Q. El Hato - La Guayaba	7,06	9,58	11,90	15,61	18,98	22,88	27,39	34,41
24	Q. Cañaveral - El Zancudo	14,05	18,76	23,15	30,27	36,84	44,65	53,89	68,76
25	Q. La Gómez	13,16	17,05	20,49	25,69	30,19	35,23	41,33	51,19
26	Q. La Guayabala	17,11	23,37	29,15	37,09	43,54	50,06	57,35	67,16
27	Q. El Ahorcado	14,37	19,04	23,39	30,43	36,92	44,62	53,75	68,46
28	Q. la Rafita - Chorro Hondo	12,43	16,64	20,55	26,92	32,81	39,80	48,10	61,46
29	Q. La Limona	13,78	18,73	23,26	29,32	34,27	39,16	44,68	51,93
30	Q. Piedra Gorda	7,74	12,32	16,62	22,75	27,71	33,15	39,05	47,16
31	Q. Piedras Blancas	43,32	63,19	81,65	108,98	131,08	154,51	180,00	214,88
32	Q. Miserenga	14,80	21,89	28,82	39,79	49,79	61,61	75,48	97,29
33	Q. Malpaso	15,04	19,90	24,18	30,49	35,73	41,39	47,86	57,25
34	Q. La Puerta	8,24	12,80	17,06	23,19	27,96	32,74	38,54	46,04
35	Q. La Pelahueso	10,14	14,34	18,04	23,20	27,11	30,91	35,40	41,11
36	Q. La Madera	10,14	14,90	19,12	25,03	29,72	34,62	40,07	47,48
37	Q. La Castro	8,97	13,30	17,19	22,63	27,04	31,81	37,05	44,24
38	Q. La Cantera Ramal Sur	4,69	6,27	7,72	10,02	12,09	14,49	17,26	21,56
39	Q. La Quintana	13,59	17,49	20,81	25,33	28,92	32,68	37,81	47,90
40	Q. La Chorrera - El Molino	23,76	32,08	39,16	48,70	56,08	63,52	71,62	82,30
41	Q. La Paulita	7,15	11,21	14,76	19,42	22,96	26,53	30,16	35,26
42	Q. La Moñonga	14,40	19,14	23,33	29,50	34,65	40,20	46,55	55,72
43	Q. La Bermejala	17,45	22,88	27,44	33,64	38,49	43,44	48,86	56,19
44	Q. La Leonarda	7,53	11,06	14,26	18,76	22,22	25,64	29,78	35,14
45	Q. La Guayaba	2,41	3,06	3,64	4,53	5,32	6,22	7,24	8,79
46	Q. La Larga	18,26	24,76	31,08	39,69	46,79	53,96	62,07	72,99
47	Q. Agua Fría	6,74	9,28	11,64	15,44	18,91	22,95	27,63	34,95
48	Q. La Despensa	33,03	40,34	46,70	56,35	64,70	74,05	84,51	100,26
49	Q. La Honda	13,01	17,92	22,18	27,96	32,44	36,99	41,95	48,50
50	Q. Minitas	20,55	23,93	26,77	30,93	34,42	38,22	42,37	48,41
51	Q. La Cañada	4,75	5,57	6,27	7,32	8,22	9,21	10,32	11,98
52	Q. La Arenera	15,17	18,68	21,75	26,41	30,45	34,98	40,05	47,66
53	Q. La García	8,73	11,55	14,11	18,16	21,79	25,97	30,77	38,17
54	Q. La Zorrita	6,44	7,94	9,26	11,26	13,00	14,96	17,16	20,47
55	Q. La Potrera	8,49	10,91	13,07	16,43	19,40	22,79	26,65	32,56
56	Q. La Mauala	11,91	14,09	15,96	18,77	21,17	23,85	26,83	31,28
57	Q. La Manguala	15,47	20,90	26,03	32,82	38,32	43,76	49,95	58,22

ID	Cuenca	Periodo de Retorno							
		2	5	10	25	50	100	200	500
58	Q. La Rafita	5,86	8,12	10,25	13,77	17,05	20,98	25,66	33,23
59	Q. La Candela	27,17	33,23	38,51	46,53	53,46	61,24	69,95	83,05
60	Q. El Rosario	8,71	12,95	16,84	22,30	26,71	31,47	36,81	44,12

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Estos valores corresponden a los caudales líquidos estimados hasta cada sitio de control y como respuesta a un evento de precipitación. Ahora, dando cumplimiento a lo recomendado en la Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales, desarrollada por el Servicio Geológico Colombiano y la Pontificia Universidad Javeriana, 2021, los caudales deberán ser complementados con el volumen sólido generado por el transporte de sedimentos y que incrementa el volumen total que transita en el tramo de interés y en especial, para un evento torrencial.

Una forma común de incluir el volumen sólido dentro del caudal de diseño consiste en incrementar los caudales líquidos en un porcentaje como aumento en el caudal líquido por la presencia de sedimentos al momento de respuestas torrenciales. Por tal razón, estos caudales son mayorados en 40%, teniendo en cuenta los lineamientos definidos dentro del Acuerdo Metropolitano 009 de 2012 – Lineamientos Metropolitanos para la Elaboración de Estudios Geológicos, Geomorfológicos, Hidráulicos, Hidrológicos y Geotécnicos y se Dictan Otras Disposiciones para la Prevención del Riesgo en Construcción en Laderas – “Código de Laderas”. En el presente documento se muestran los resultados de los estudios básicos para la zonificación de la amenaza por inundación y avenidas torrenciales en la zona de interés para el territorio del Distrito Especial de Medellín. Para este análisis, se tiene en consideración como máximo caudal probable en un evento torrencial al caudal con periodo de retorno de 500 años con presencia de sedimentos (mayorado en 40%), condición que cumple con lo recomendado por la GUÍA METODOLÓGICA PARA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES, desarrollado por el Servicio Geológico Colombiano y la Pontificia Universidad Javeriana, 2021.

Con el fin de utilizar el procedimiento 2D dispuesto en el modelo HEC RAS 6.7 Beta 3, es necesario contar con un hidrograma de crecientes en el cual se pueda considerar el incremento de los caudales a medida que el tiempo de la tormenta va avanzando, hidrograma que puede iniciar desde un caudal mínimo hasta alcanzar el pico máximo para posteriormente, iniciar nuevamente el descenso del hidrograma. Las condiciones del hidrograma de entrada al modelo hidráulico son necesarias para adelantar el análisis hidráulico mediante *un Unsteady Flow Simulation* – Simulación de Flujo Inestable, y esta información y la forma de construcción del hidrograma, será descrita en capítulos posteriores.

9.2.3 Estudios Disponibles

En el desarrollo de los estudios básicos de amenaza por inundación y avenidas torrenciales para el distrito de Medellín, se tuvo en consideración diferentes estudios disponibles, especialmente para el río Aburrá (río Medellín) con la finalidad de contar con los resultados en mapas de profundidad y velocidad para el periodo de retorno de 100 años y como información base en la zonificación de la amenaza por inundación en esta corriente. En primer lugar, se cuenta con el documento: ESTUDIO DETALLADO DE AMENAZA POR INUNDACIÓN DEL RÍO MEDELLÍN EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE LA CLARA Y LA QUEBRADA LA JABALCONA; ESTUDIO DE SUSCEPTIBILIDAD A LA OCURRENCIA DE AVENIDAS TORRENCIALES EN EL SECTOR AGUAS ARRIBA DE LA CLARA Y, MONITOREO DEL TRAMO CANAL IZADO DEL RÍO MEDELLÍN HASTA EL HATILLO EN EL VALLE DE ABURRÁ, desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá en junio de 2022. Adicionalmente, se dispone del estudio: ESTUDIO DE AMENAZA POR INUNDACIÓN DEL RÍO MEDELLÍN EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE LA QUEBRADA LA JABALCONA Y EL PUENTE DE LA MADRE LAURA, ASOCIADO A LA VARIACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS POR EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y CAMBIO EN EL USO DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO MEDELLÍN EN EL VALLE DE ABURRÁ, también desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y para octubre de 2023.

Esta información ha sido retomada con la finalidad de contar con el campo de profundidad y velocidad para el caudal con periodo de retorno de 100 años, información de relevancia en el proceso de zonificación de la amenaza por inundación, toda vez que corresponde al fenómeno natural relacionado con el río Medellín. Esta información será ampliada a lo largo del presente documento.

9.3 DIAGNÓSTICO - EVALUACIÓN CONDICIONES EXISTENTES – ZONA URBANA Y CORREGIMIENTOS

La modelación del tránsito hidráulico de caudales máximos en los diferentes drenajes localizados en el territorio del distrito de Medellín y que fueron objeto de priorización (60 cuencas), se hizo utilizando el programa HEC-RAS versión 6.7 Beta 3, desarrollado por el *U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering* (*U.S Army Corps of Engineers*, 2002a).

El software requiere como datos de entrada las condiciones de borde, la geometría o terreno, el valor de rugosidad de Manning *n* y los caudales de diseño, solucionando a través de elementos finitos para la solución del movimiento del agua en dos dimensiones – 2D.

En primer lugar, se realiza la calibración del modelo hidráulico, la cual consiste en ajustar los diferentes parámetros de entrada al modelo y así poder realizar la evaluación de las condiciones reales de los drenajes de interés, es decir, que la situación modelada en HEC-RAS, represente las condiciones y evidencias del tránsito del flujo a través del canal de la corriente. Para ello, se realiza la

estimación del coeficiente de rugosidad de Manning y se evalúa el comportamiento de los caudales de diseño calculados en el estudio hidrológico y que los mismos representen el flujo de crecientes al interior del canal de la corriente.

El estudio busca analizar el comportamiento de los caudales máximos, generando la mancha de inundación para el escenario actual y evaluar la incidencia de la corriente en todo el tramo colindante con el suelo del distrito de Medellín, análisis que evalúa la amenaza por inundación y avenidas torrenciales como parte de los estudios básicos de amenaza para ser integrados en el desarrollo en el componente de ordenamiento del distrito.

Para la simulación hidráulica, se agruparon los ejes de las cuencas priorizadas en diferentes modelos, basados en los tiempos computacionales de cada uno; este tiempo se buscó optimizar una vez se contó con mallados y pasos de tiempo que lograran la estabilidad numérica, por lo cual la segmentación de los tramos de simulación obedece a una condición técnica de capacidad computacional, garantizando en lo posible que se lograran simular las condiciones de las confluencias entre cuencas subsiguientes.

Los modelos implementados comparten en su mayoría las características de simulación, tales como tamaño de celdas, pasos de tiempo, condiciones de frontera (hidrógrafas, niveles de descarga), mientras que los coeficientes de Manning se asignaron según la capa de coberturas y usos de suelo. En la Tabla 51 se presenta la agrupación de las fuentes hídricas en cada uno de los modelos elaborados para la simulación.

Tabla 51 Agrupación de corrientes en los modelos hidráulicos Carpeta Zona 1

Modelo	Corriente	Tiempo (horas)	Paso T (segundos)
Modelo 1	Q. Doña María	1,00	0,50
	Q. La Astillera	1,00	0,50
	Q. Minitas	1,00	0,50
Modelo 2	Q. La Larga	1,00	0,50
	Q. La Despensa	1,00	0,50
	Q. La Candela	1,00	0,50
Modelo 3	Q. La Limona	1,00	0,50
	Q. La Cañada	1,00	0,50
	Q. La Zorrita	1,00	0,50
	Q. La Mauala	1,00	0,50
	Q. La Manguala	1,00	0,50
Modelo 4	Q. La Presidenta	1,00	0,50
	Q. La Poblada	1,00	0,50
	Q. La Escopetería	1,00	0,50
	Q. La Aguacatala	1,00	0,50
	Q. Zuñiga	1,00	0,50
	Q. La Paulita	1,00	0,50
Modelo 5	Q. Santa Elena	1,00	0,50

Modelo	Corriente	Tiempo (horas)	Paso T (segundos)
Modelo 6	Q. El Ñato	1,00	0,50
	Q. la Rafita - Chorro Hondo	1,00	0,50
	Q. La Castro	1,00	0,50
	Q. La Rafita	1,00	0,50
Modelo 7	Q. La Hondita	1,00	0,50
	Q. La Seca	1,00	0,50
	Q. Cañaveral - El Zancudo	1,00	0,50
	Q. El Ahorcado	1,00	0,50
	Q. La Chorrera - El Molino	1,00	0,50
	Q. La Bermejala	1,00	0,50
	Q. La Honda	1,00	0,50
Modelo 8	Q. Piedra Gorda	1,00	0,50
	Q. Piedras Blancas	1,00	0,50
	Q. El Rosario	1,00	0,50
Modelo 9	Q. La Hueso	1,00	0,50
	Q. La Pelahueso	1,00	0,50
	Q. La Leonarda	1,00	0,50
Modelo 10	Q. Ana Diaz	1,00	0,50
Modelo 11	Q. La Picacha	1,00	0,50
	Q. La Guayaba	1,00	0,50
Modelo 12	Q. Altavista	1,00	0,50
	Q. La Guayabala	1,00	0,50
Modelo 13	Q. La Lejia	1,00	0,50
	Q. La Sucia	1,00	0,50
	Q. La Frisola	1,00	0,50
	Q. Miserenga	1,00	0,50
Modelo 14	Q. La Chorrera	1,00	0,50
Q. La Iguana	Q. La Iguana	1,00	0,50
	Q. La Moñonga	1,00	0,50
Q. Potreritos	Q. Potreritos	1,00	0,50
	Q. La Arenera	1,00	0,50
Q. La Potrera	Q. La Potrera	1,00	0,50
Q. La Puerta	Q. La Puerta	1,00	0,50
Q. La Borbollona	Q. La Borbollona	1,00	0,50
Q. El Hato	Q. El Hato - La Guayaba	1,00	0,50
Q. La Gómez	Q. La Gómez	1,00	0,50
Q. Malpaso	Q. Malpaso	1,00	0,50
Q. La Madera	Q. La Madera	1,00	0,50
Q. La Cantera	Q. La Cantera Ramal Sur	1,00	0,50
Q. La Quintana	Q. La Quintana	1,00	0,50
Q. Aguas Frías	Q. Aguas Frías	1,00	0,50
Q. La García	Q. La García	1,00	0,50

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

La agrupación de los modelos se realizó con base en la ubicación geográfica de cada una de las corrientes, buscando en lo posible simular corrientes afluentes entre sí. Para logar la convergencia de los modelos, en especial en las zonas de alta pendiente, se requirió disminuir el tamaño del mallado y el paso de tiempo, aumentando el periodo de tiempo computacional requerido para logar la modelación, por lo cual en algunos casos se realizó el fraccionamiento de modelos, de forma tal que se lograran tiempos de simulación razonables con el periodo de ejecución del proyecto. Finalmente se lograron agrupar de la siguiente forma:

Modelo 1. Incluye la simulación de la quebrada Doña María como eje principal y se incluyeron las quebradas La Astillera y Minita que se encuentran en la parte alta de la hoya hidrográfica.

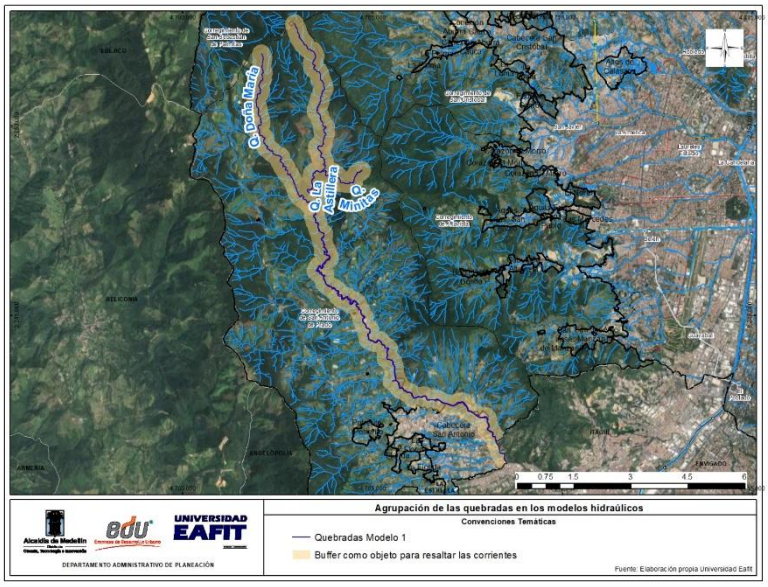


Ilustración 170 Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 1

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

Modelo 2. Considera afluentes intermedios de la quebrada Doña María en su parte media alta, y se lograron incluir las quebradas La Larga, La Despensa y La Candela.

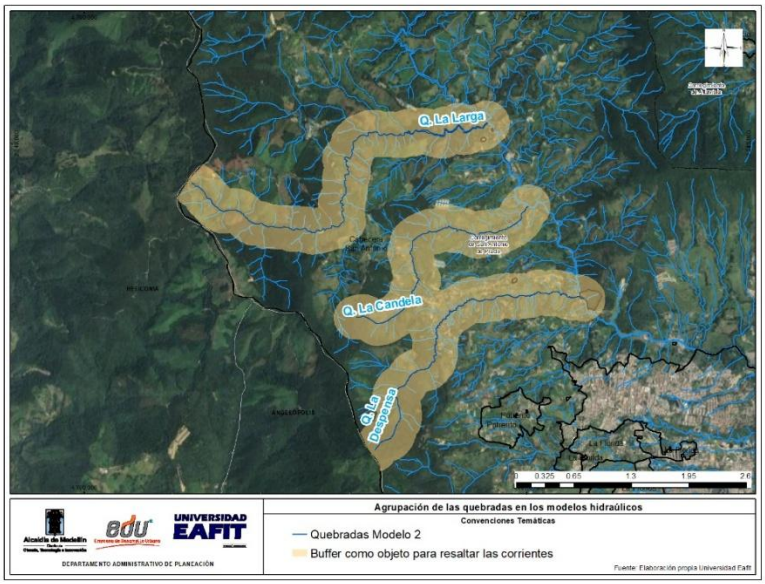


Ilustración 171. *Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 2*

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

Modelo 3. Agrupa afluentes intermedios de la quebrada Doña María en su parte media y baja, y se lograron incluir las quebradas Q. La Limona, La Cañada, La Zorrita, La Mauala y La Manguala.

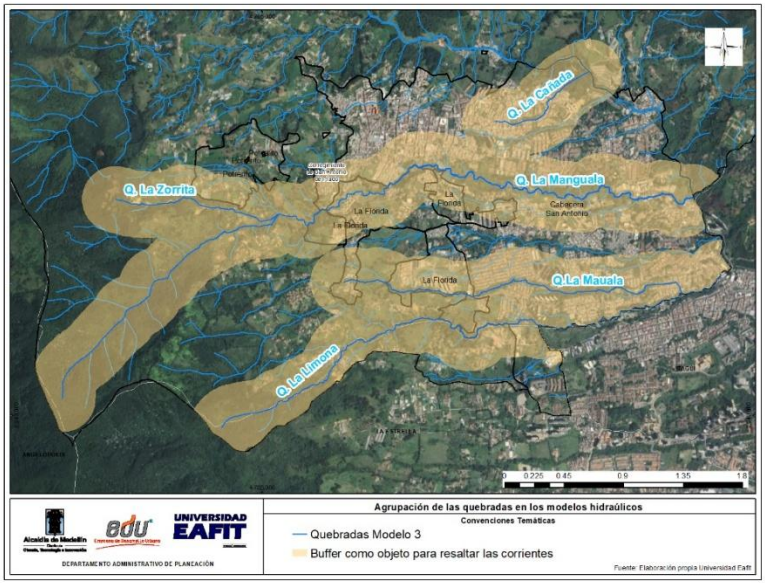


Ilustración 172. *Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 3*

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

Modelo 4. Se incluyen las quebradas de la zona Suroccidental del Distrito y corresponden a quebrada La Presidenta y sus afluentes quebradas La Poblada y La Escopetería, así como Q. La Aguacatala, Q. Zúñiga, La Paulita y La Volcana.

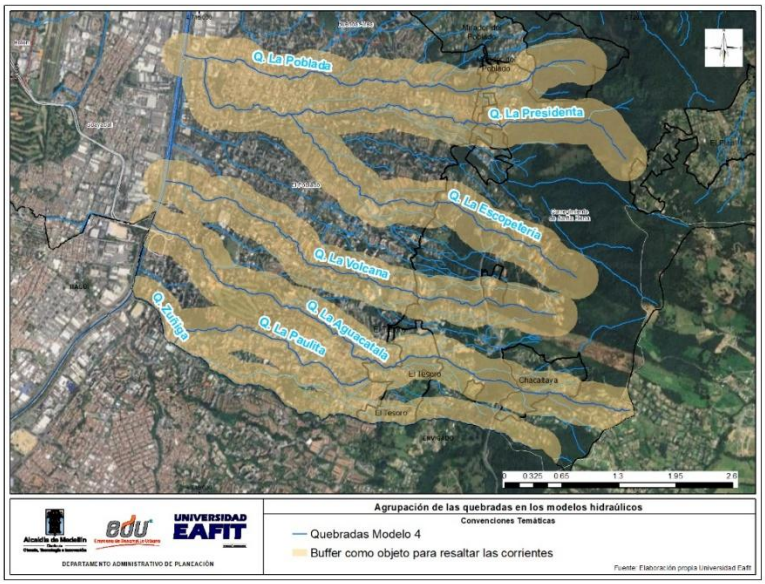


Ilustración 173. *Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 4*

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

Modelo 5. Q. Santa Elena. En este caso no se incluyeron afluentes debido a la extensión del eje de modelación y la carga computacional.

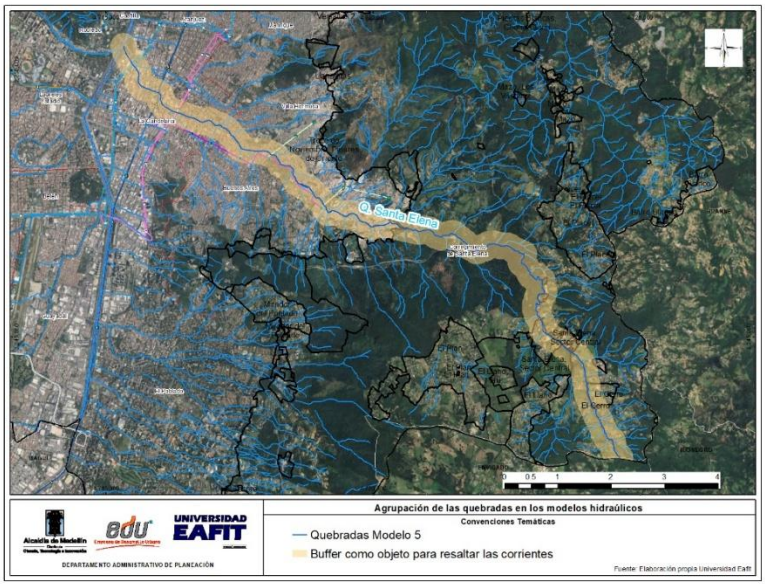


Ilustración 174. *Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 5*

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

Modelo 6. Agrupa afluentes de la quebrada Santa Elena, que corresponde a quebradas El Ñato, Chorro Hondo, La Castro y La Rafita. Se opta aquí por un criterio de localización de las cuencas en la misma zona.

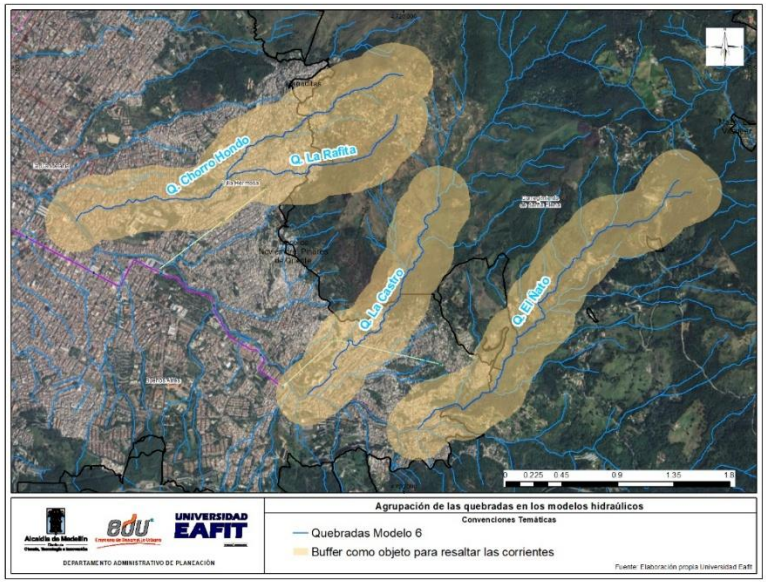


Ilustración 175. *Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 6*

Fuente: Universidad EAFIT, 2026

Modelo 7. Con un criterio de localización, se incorporan las corrientes ubicadas en la zona Nororiental del Distrito de Medellín, las cuales comprenden las quebradas Q. La Hondita, Q, La Honda, Q. La Seca, Q. Cañaverales, Q. El Ahorcado, Q. EL Zancudo.

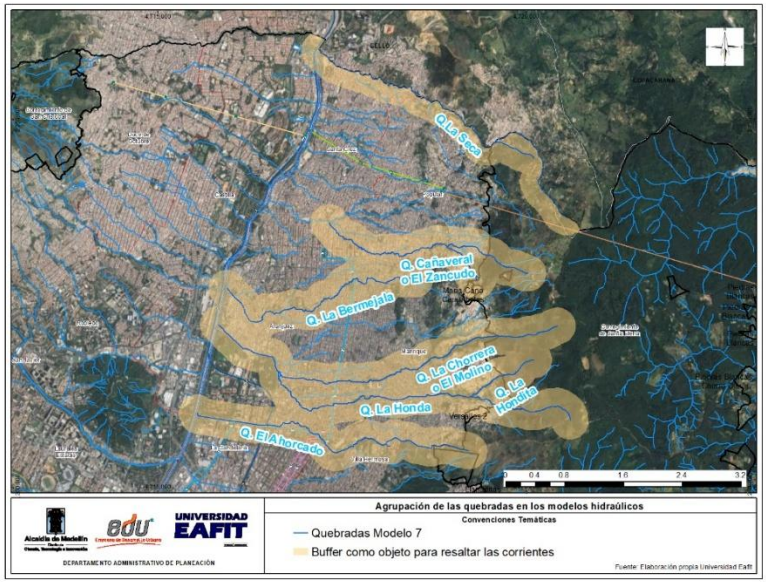


Ilustración 176. *Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 7*

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

Modelo 8. Corresponde a la quebrada Piedras Blancas y sus afluentes Q. Piedra Gorda y Q. El Rosario.

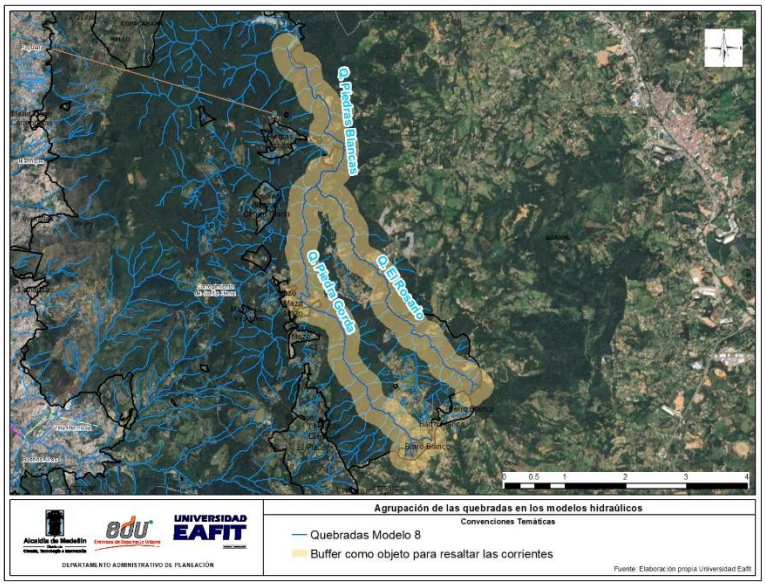


Ilustración 177. *Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 8*

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

Modelo 9. Incluye la simulación del eje principal de la quebrada La Hueso y sus afluentes de la parte alta Q. Pelahueso, Q. La Leonarda.

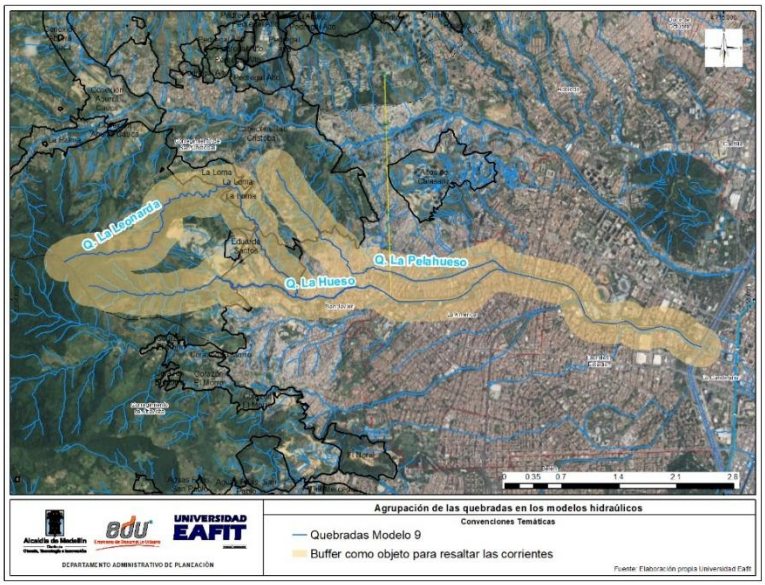


Ilustración 178. *Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 9*

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

Modelo 10. Incluye sólo el eje de la quebrada Ana Díaz, incluyendo un tramo de la confluencia con la Q. La Hueso.

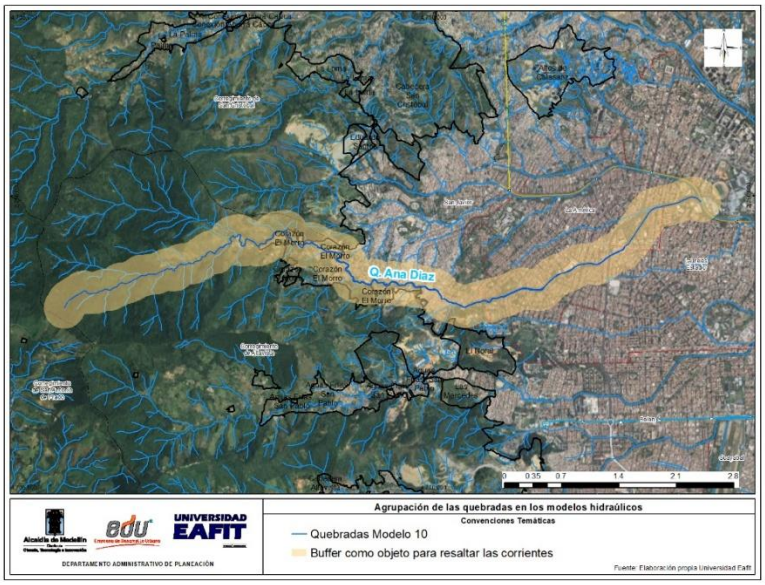


Ilustración 179. *Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 10*

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

Modelo 11. Considera la simulación de la quebrada La Picacha y su afluente la Q. La Guayaba.

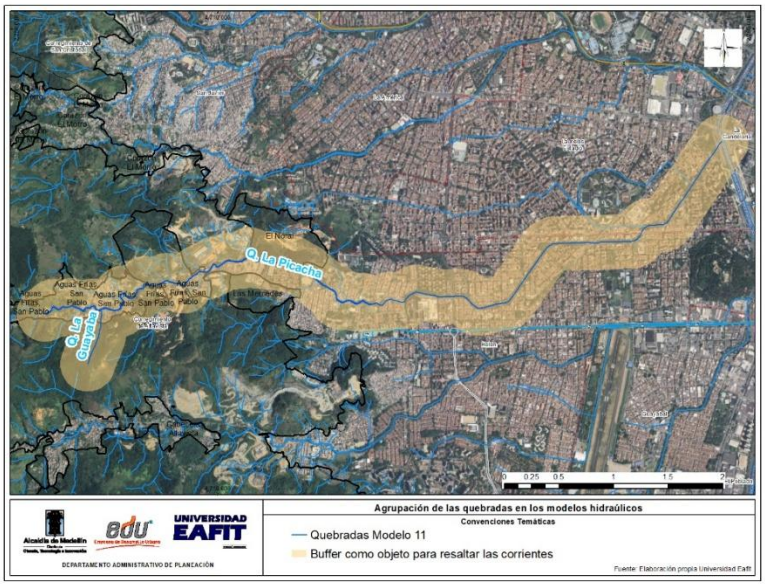


Ilustración 180. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 11

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

Modelo 12. Incluye la simulación de las quebradas La Altavista y La Guayabala que convergen antes de confluir al río Medellín.

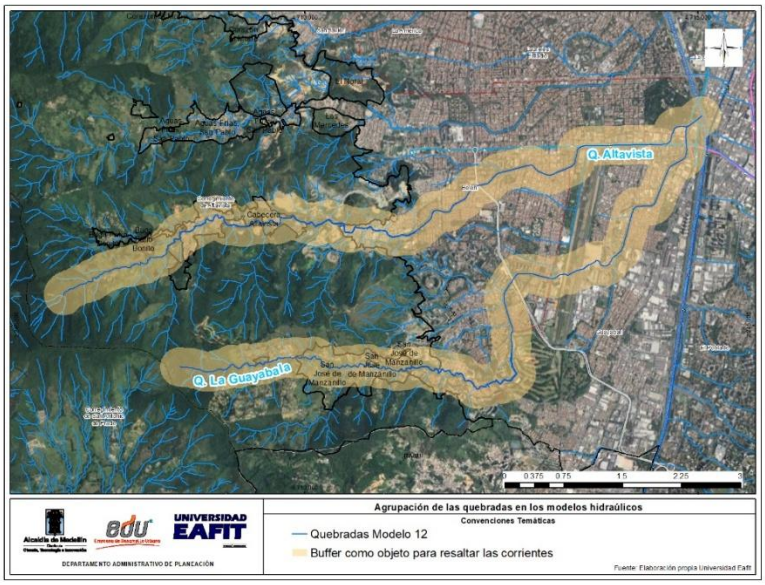


Ilustración 181. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 12

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

Modelo 13. Corresponde la simulación del eje principal de la quebrada La Sucia y sus afluentes las quebradas La Lejía, La Frisola y La Miserenga.

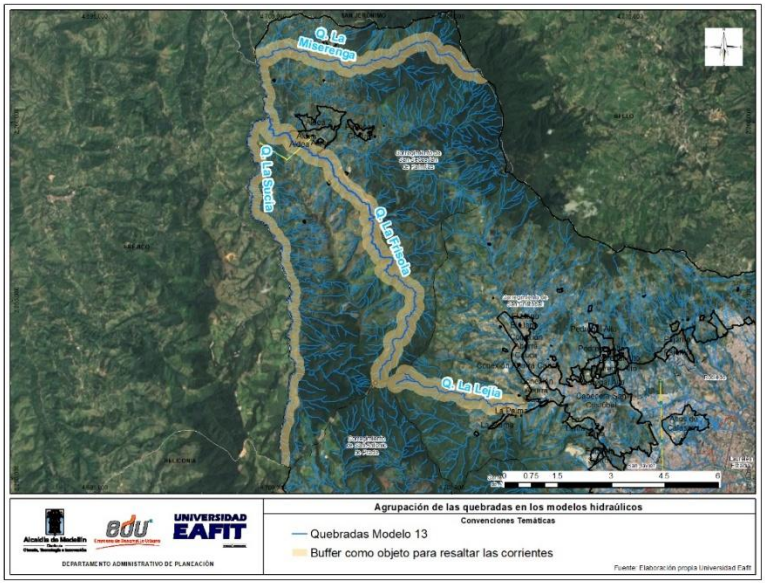


Ilustración 182. *Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 13*

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

Modelo 14. Corresponde sólo a la quebrada La Chorrera afluente de la Q. Doña María, incluida posteriormente durante el desarrollo del proyecto.

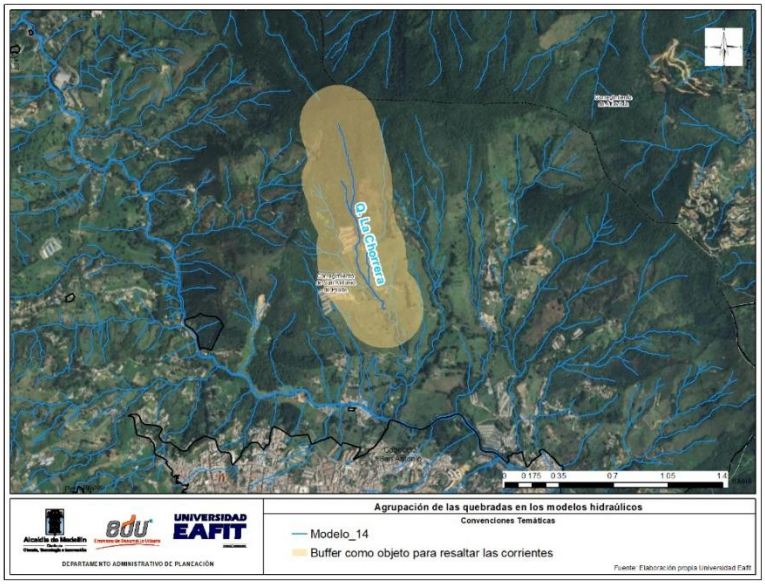


Ilustración 183. *Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico 14*

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

Modelo Q. La Iguaná: Corresponde a la simulación de la quebrada La Iguaná y su afluente la Q. La Moñonga.

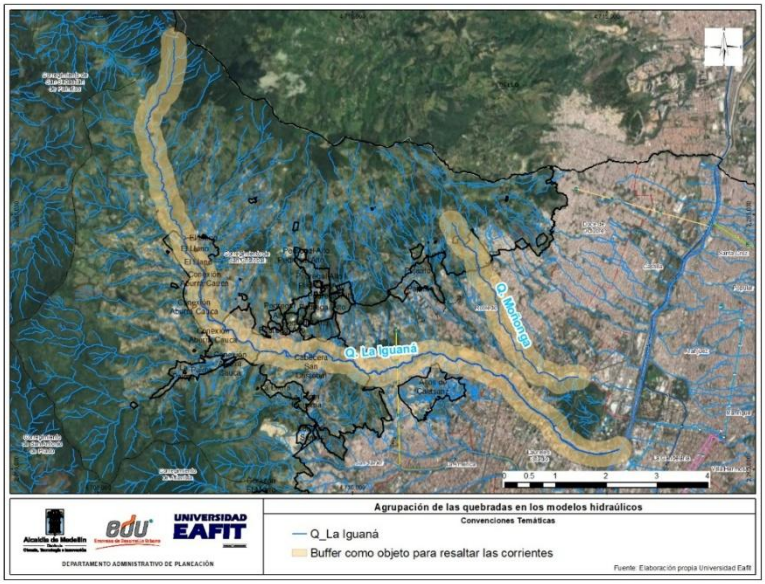


Ilustración 184. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico Q. La Iguaná

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

Modelo Q. Potreritos: Corresponde a la simulación de la quebrada Potreritos y su afluente la Q. La Arenera considerando la continuidad espacial de las corrientes.

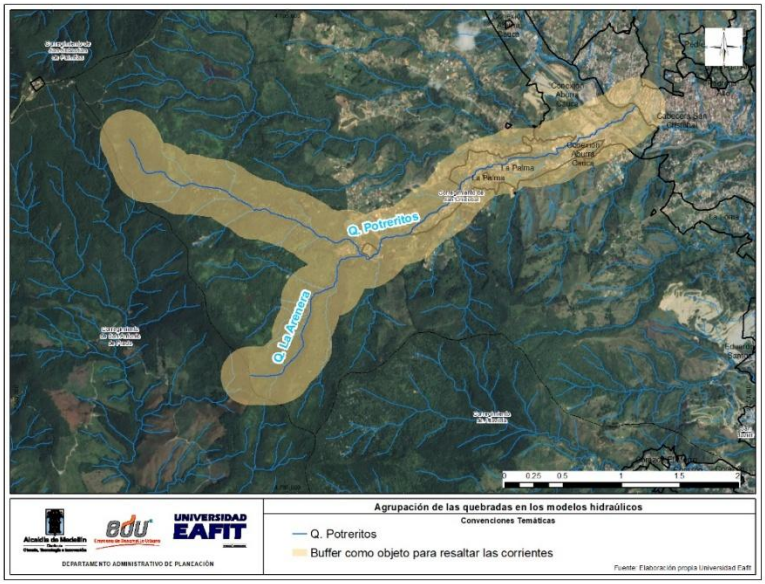
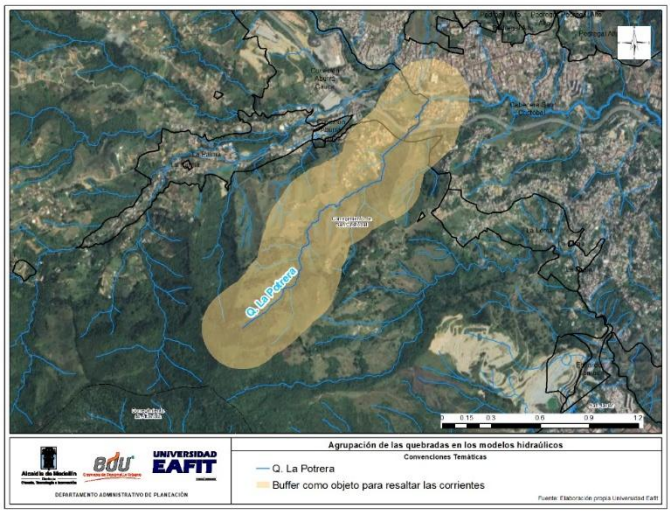


Ilustración 185. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico Q. Potreritos

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

Finalmente, las quebradas La Potrera, La Puerta, Borbollona, El Hato, La Gómez, Malpaso, La Madera, La Cantera, La Quintana, Aguas Frías y La García se simularon en modelos independientes, denominados con el mismo nombre del afluente y considerando como criterio el tiempo de simulación para optimizar los procesos.



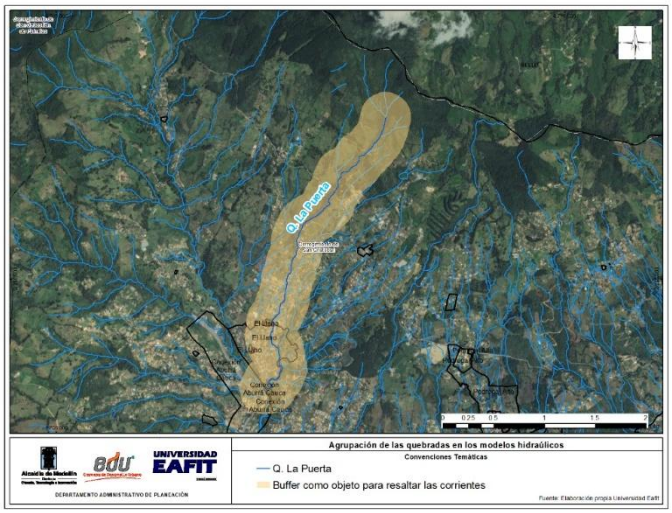
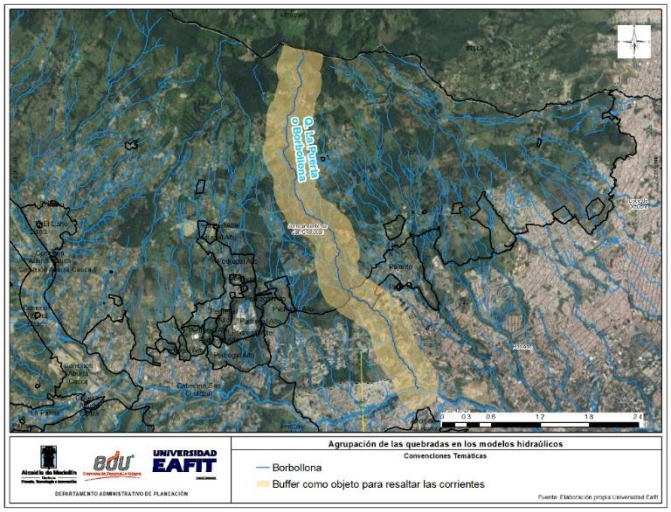


Ilustración 186. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico La Potrera

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

Ilustración 187. *Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico La Puerta*

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.



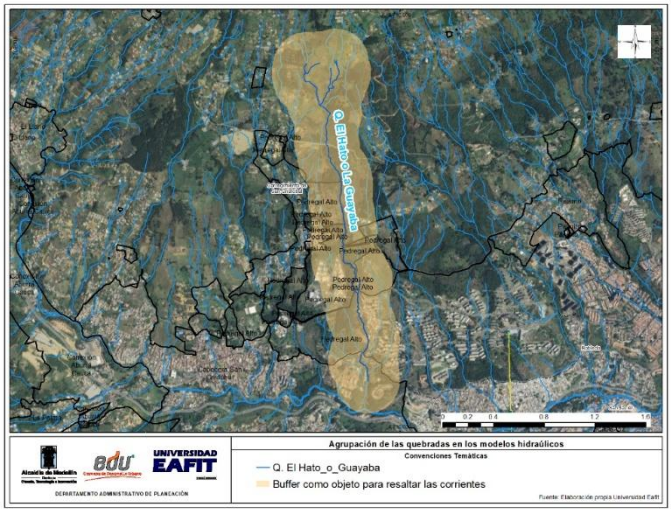
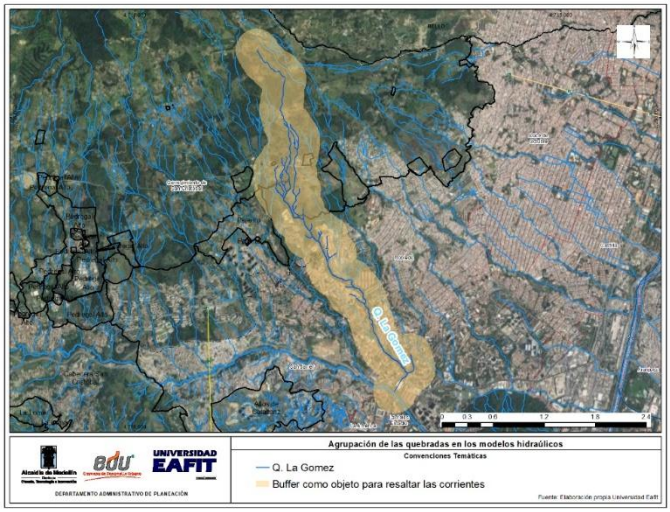


Ilustración 188. *Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico La Borbollona*

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

Ilustración 189. Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico El Hato

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.



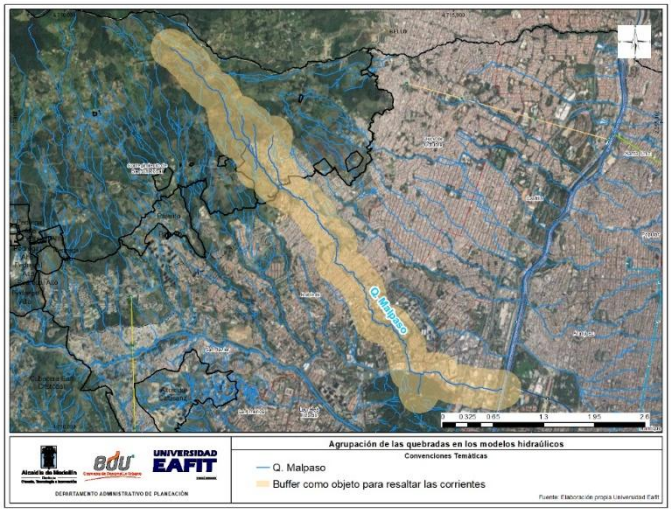


Ilustración 190. *Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico La Gómez*

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

Ilustración 191. *Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico La Malpaso*

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

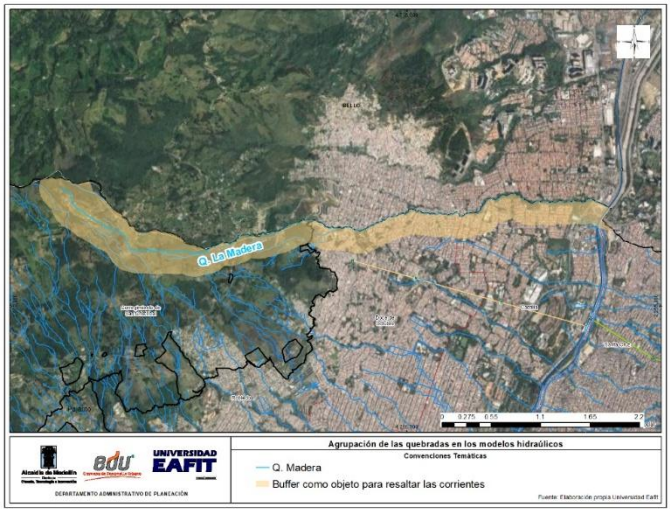


Ilustración 192. *Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico La Madera*

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

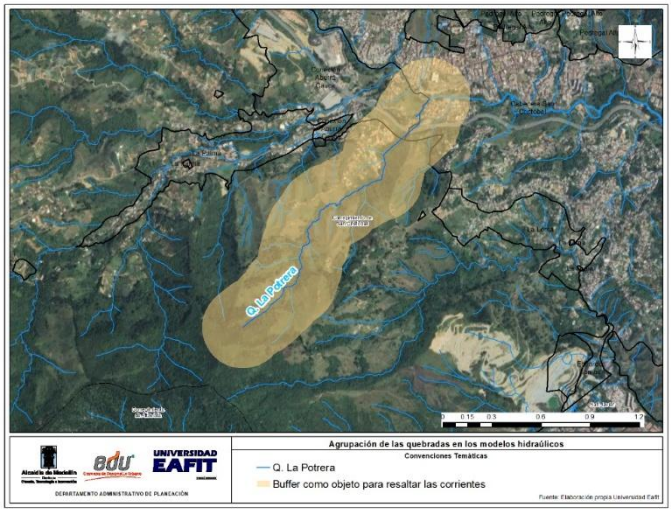


Ilustración 193. *Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico La Potrera*

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

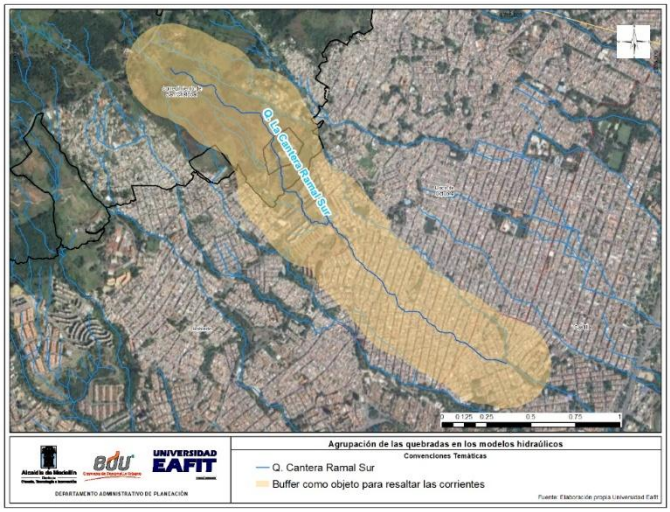


Ilustración 194. *Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico La Cantera*

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

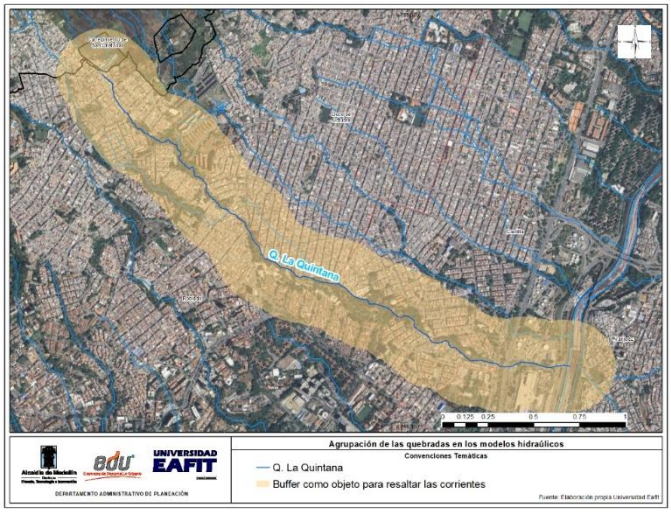


Ilustración 195. *Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico La Quintana*

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

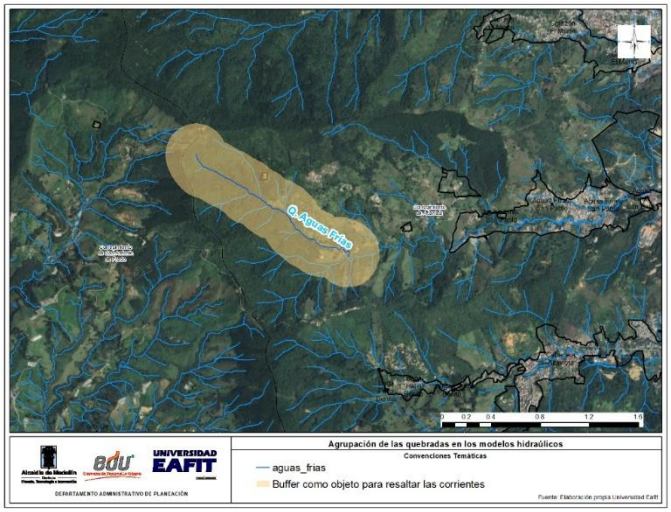


Ilustración 196. *Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico Aguas Frías*

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

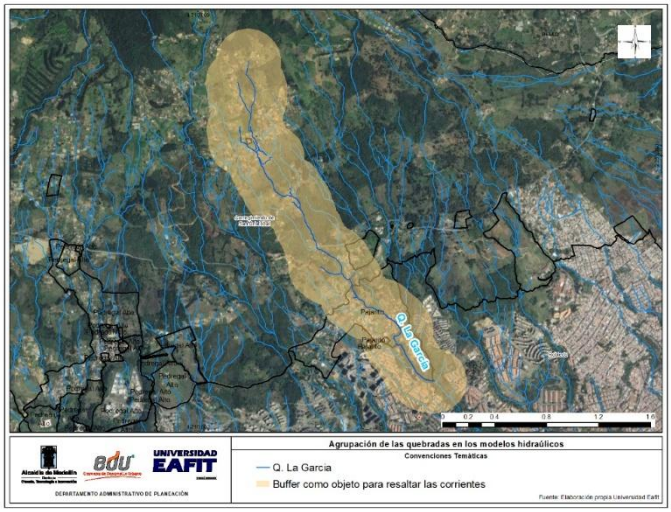


Ilustración 197. *Fuentes hídricas incluidas en el modelo hidráulico La García*

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

9.3.1 Parámetros De Entrada Modelo 2D

9.3.1.1 Coeficiente de Rugosidad

Los coeficientes de resistencia al flujo uniforme en canales de lecho rígido se encuentran tabulados en muchos libros clásicos de hidráulica (CHOW V. T., 1992). El *n* de Manning es muy variable y depende de un cierto número de factores, como lo es la rugosidad del material superficial, las macro rugosidades del canal, la vegetación, el alineamiento del canal y las posibles obstrucciones (CHOW V. T., 1992). A partir del reconocimiento de varios factores primordiales que afectan el coeficiente de rugosidad, Chow (CHOW V. T., 1992) desarrolló un procedimiento para estimar el valor de *n*. Mediante este procedimiento, el valor de *n* puede calcularse por la expresión de Cowan (mencionado en Chow, 1994):

$$\boldsymbol{n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m}$$

donde n_0 es un valor básico de n para un canal recto, uniforme y liso en los materiales naturales involucrados, n_1 es un valor que debe agregarse al n_0 para corregir el efecto de las rugosidades superficiales, n_2 es un valor para considerar las variaciones en forma y tamaño de la sección transversal del canal, n_3 es un valor para considerar las obstrucciones, n_4 es un valor para considerar la vegetación y las condiciones de flujo, y *m* es un factor de corrección de los efectos por meandros en el canal.

Según las características de los canales de las quebradas de interés, este corresponde a un lecho natural con arrastre de material grueso tipo guijarros y cantos rodados con presencia de gravas y

arenas para las zonas de alta montaña y donde el tamaño se reduce a lo largo de su cauce debido a la reducción de la pendiente del canal de los drenajes, que, de acuerdo a las diferentes características del tramo de interés, se escogen los valores para los parámetros que conforman el método propuesto por Cowan, mencionado en (CHOW V. T., 1992). Para este análisis, se utilizó la información de la capa de cobertura de la *geodatabase* del POMCA del río Aburrá 2018. Luego mediante procesamiento geográfico (Unión) realizado en el software ArcGis v. 10.8, se incorporan las coberturas terrestres suministradas por planeación para los corregimientos de San Sebastián de Palmitas y San Antonio de Prado. Finalmente, se realiza una edición de coberturas de todo el distrito, utilizando la ortofoto para el municipio de Medellín del año 2024 disponible en el servidor de mapas del Distrito, ajustando las zonas que han venido ocupándose con la categoría de tejido urbano discontinuo y continuo. El resumen de los parámetros y el cálculo del coeficiente de rugosidad se muestra en la Tabla *52*.

Tabla 52. Coeficientes de rugosidad n de Manning

Cobertura	n Manning
Arbustos y matorrales	0,055
Bosque denso	0,065 - 0,120
Cauce canalizado	0,015
Cauce natural alta pendiente	0,053 - 0,065
Cauce natural media pendiente	0,038 - 0,040
Cuerpos de agua superficiales	0,035
Herbazal	0,050
Mosaico de cultivos	0,040
Mosaico de pastos con EN	0,030 - 0,050
Pastos limpios	0,035 - 0,045
Plantación forestal	0,065 - 0,100
Tejido urbano continuo	0,025 - 0,075
Tejido urbano discontinuo	0,065
Vegetación secundaria	0,050
Zonas mineras y desnudas	0,035
Zonas verdes urbanas	0,045

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

El valor estimado, pudo ser verificado de acuerdo con la información disponible dentro del documento: *Roughness Characteristics of Natural Channels*, desarrollado por Harry H. Barnes, Jr. Y *para U.S. Geological Survey Water-Supply Paper* 1849, donde se presenta el cálculo del coeficiente de rugosidad *n* de manning para diferentes tipos de canales naturales. Adicionalmente, se tuvieron en consideración, todas las características y condiciones definidas dentro del texto: *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains*, desarrollado por George J. Arcement, Jr., y Verne R. Schneider, para el *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper*

2339, en el año 1989, en cuanto a la determinación de cada uno de los parámetros definidos en el método de Cowan.

9.3.1.2 Creación de Capas de Cobertura Terrestre, Valores n de Manning y % de Impermeabilidad

Se puede crear una capa de cobertura terrestre que varíe espacialmente en RAS Mapper y luego asociarla con un conjunto de datos de geometría específico. Una vez que se crea un conjunto de datos de cobertura terrestre, se puede especificar los valores *n* de Manning que se utilizarán para cada tipo de cobertura terrestre. Además, se puede crear sus propios polígonos de clasificación de cobertura terrestre (polígonos definidos), en los que puede anular las capas de cobertura terrestre base dentro de ese polígono y definir un nuevo tipo de cobertura terrestre. Los polígonos de clasificación definidos se utilizan a menudo para áreas de canales.

La creación de clasificaciones de cobertura terrestre definidas permitirá crear un buen conjunto de valores n de Manning base para estos polígonos de clasificación definidos. Se puede dibujar más de un polígono y darle el mismo nombre. Sin embargo, solo se puede establecer un valor *n* de Manning para cada polígono de clasificación de cobertura terrestre definido. Entonces, si los valores de *n* de Manning deben ser diferentes, entonces los polígonos deben tener nombres diferentes. También se pueden especificar el porcentaje de impermeabilidad para cada uno de los tipos de cobertura terrestre. El porcentaje de impermeabilidad es opcional y solo es necesario si está modelando la precipitación y la infiltración. En la Ilustración 198, se presenta la distribución de las diferentes regiones que componen las coberturas vegetales en la zona de interés, con el respectivo valor del *n* de Manning definidos en toda la longitud estudiada, y para la zona colindante con el territorio del distrito de Medellín, departamento de Antioquia.

9.3.1.3 Condiciones de Frontera y Condiciones Iniciales – Áreas 2D

Las condiciones de Frontera consisten en condiciones de límite externas a lo largo del perímetro del área 2D, condiciones de límite interno y condiciones de límite global (datos meteorológicos) que se aplican a todo el modelo (es decir, precipitación, viento, etc.). Hay cuatro tipos de condiciones de límite externas que se pueden vincular directamente a los límites de las áreas de flujo 2D, estos son (Hidrograma de flujo, Hidrograma de etapa, Profundidad normal, Curva de calibración).

Las condiciones de límite de profundidad normal y curva de calibración solo se pueden usar en ubicaciones donde el flujo dejará un área de flujo 2D. Las condiciones de límite del hidrograma de flujo y de etapa se pueden utilizar para introducir o sacar flujo de un área de flujo 2D. Para un hidrograma de flujo, los valores de flujo positivo enviarán flujo a un área de flujo 2D y los valores de flujo negativos sacarán el flujo de un área 2D. Para el hidrograma de etapa, las etapas más altas que el suelo o la superficie del agua en un área de flujo 2D enviarán flujo hacia adentro, y las etapas más bajas que la superficie del agua en el área de flujo 2D enviarán flujo hacia afuera. Si una celda está seca y la condición de límite de la etapa es menor que la elevación mínima de la celda del área de flujo 2D, el flujo no se transferirá.

Hay dos tipos de condiciones de contorno interno que se pueden utilizar en HEC-RAS (Hidrograma de flujo, Precipitación). La condición de límite de precipitación se puede aplicar directamente a cualquier área de flujo 2D como una serie de tiempo de exceso de lluvia. Este método es limitante porque aplica la misma precipitación espacialmente a toda el área de flujo 2D. Las condiciones de contorno globales son condiciones de contorno que se aplican a todo el modelo. Los tipos de condiciones de contorno globales actuales son (Precipitación, Evapotranspiración, Viento). Los nuevos métodos para ingresar las condiciones de los límites del viento y la precipitación global pueden ser en forma de datos cuadriculados o datos de medición puntual. Si se utilizan datos de forma puntual, entonces la información se interpola entre estos utilizando varios métodos opcionales.

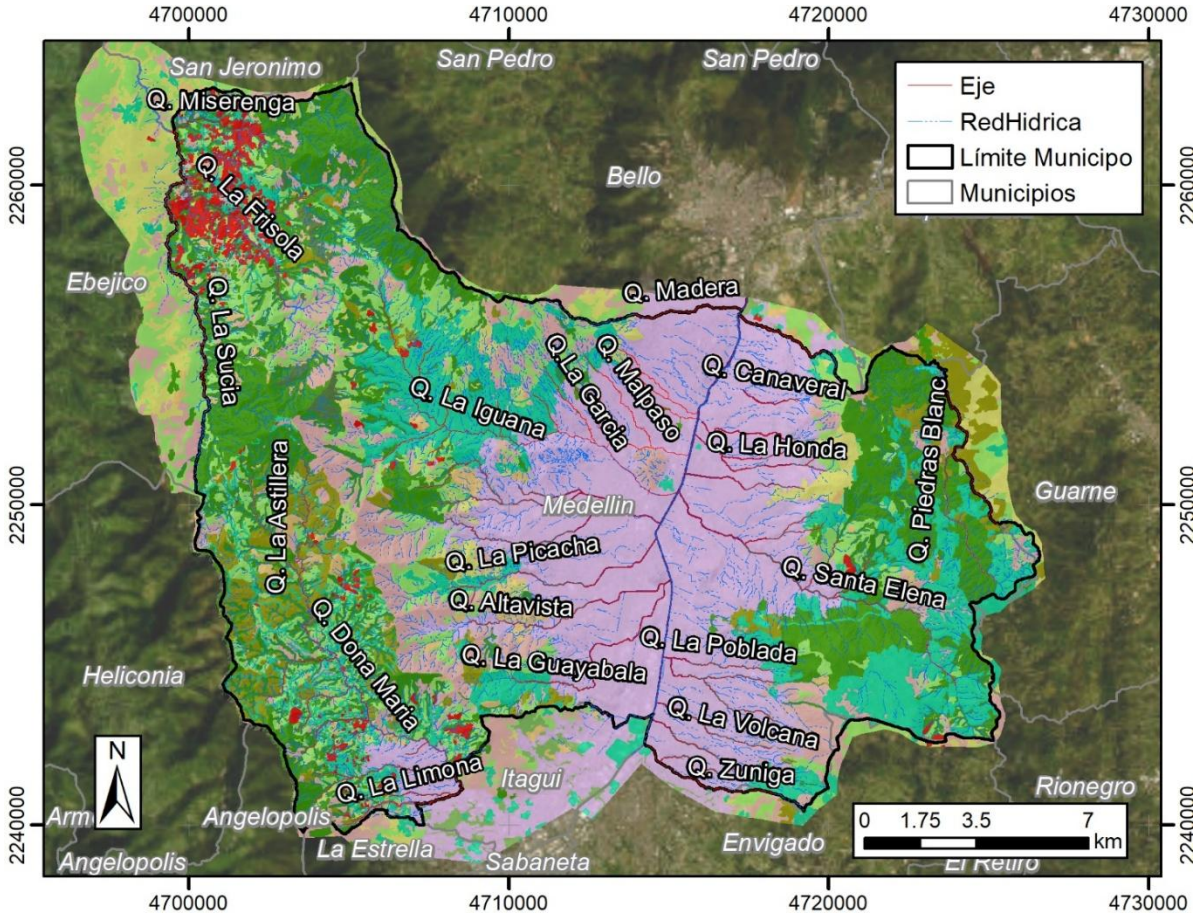


Ilustración 198. Regiones con n de Manning para el escenario evaluado

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Para realizar el cálculo hidráulico dentro del modelo HEC RAS v 6.7 Beta 3, y mediante una solución con áreas 2D, es necesario realizar la simulación de forma *Unsteady Flow* – Flujo no permanente, lo que conlleva a ingresar los caudales de diseño en forma de un hidrograma, donde se deberá contar con un dato de caudal y un tiempo dado, información que se amplía a continuación.

Hidrograma de flujo

Un hidrograma de flujo se usa generalmente para llevar el flujo a un área de flujo 2D; sin embargo, también se puede utilizar para extraer caudal (valores de caudal negativos). Los datos necesarios para este tipo de condición de contorno son: Hidrograma de flujo (descarga, Q, en función del tiempo), Pendiente de energía (para calcular la profundidad normal).

La pendiente de energía se utiliza para calcular una profundidad normal a partir del caudal dado y los datos de la sección transversal (datos del terreno subyacente) a lo largo de la línea de condición de límite para cada paso de tiempo computacional. Luego se calcula una distribución de flujo en la sección transversal (basada en la superficie del agua de profundidad normal y el transporte en la sección transversal debajo de la línea de Condición de Límite 2D) y esta distribución de flujo se usa para distribuir apropiadamente el flujo a las celdas a lo largo de la condición de límite. En cualquier paso de tiempo dado, sólo una parte de la línea de condición de límite puede estar mojada, por lo que solo las celdas en las que la elevación de la superficie del agua es más alta que el terreno de la cara del límite exterior recibirá agua. Sin embargo, si la superficie del agua de profundidad normal calculada es más alta que todos los datos de elevación de la cara límite a lo largo de la línea de condición de límite, todas las celdas recibirán agua según un enfoque de ponderación de transporte.

Profundidad normal

La condición límite de profundidad normal solo se puede utilizar para sacar el flujo de un área de flujo 2D. Cuando se usa la condición de límite de profundidad normal, se requiere el ingreso de una pendiente de fricción para esa área, que también se requiere para una ubicación de sección transversal 1D. La pendiente de fricción se puede basar en la pendiente del terreno en las proximidades de la línea de condición de límite del área de flujo 2D. La Pendiente de Fricción se usa dentro de la ecuación de Manning para calcular una elevación de la superficie del agua de Profundidad Normal para cada flujo dado, basado en la sección transversal debajo de la línea de Condición de Límite 2D. Al igual que el límite del hidrograma de etapa, el límite de profundidad normal se calcula por celda.

Para el caso de estudio y relacionado con los diferentes drenajes priorizados y que se encuentran al interior del distrito de Medellín (60 cuencas), se escoge como condiciones de frontera externas, la entrada de un hidrograma justo en el sitio donde el flujo ingresa en la superficie o área 2D, y profundidad normal en la zona de salida del flujo, es decir, en la zona aguas abajo del área 2D, análisis que se hace en conjunto con el posible control del flujo a ejercer por parte del río Medellín para una creciente asociada a un periodo de retorno de 10 años.

El presente estudio, busca evaluar el comportamiento de los caudales máximos en el sistema fluvial, con mayor enfoque para la respuesta de la corriente ante el caudal con periodo de retorno de 100

años para el análisis de amenaza por inundación y 500 años más sedimentos como escenario extremo para avenidas torrenciales, en cumplimiento con el Decreto 1807 de 2014, integrado en el Decreto 1077 de 2015, en cuanto a los estudios básicos para la determinación de la amenaza. El software HEC RAS v 6.7 Beta 3 en su módulo bidimensional 2D, requiere el ingreso de un hidrograma de creciente que permita analizar la respuesta hidráulica al ingresar cada uno de los caudales en el sistema. Para generar los escenarios de modelación necesarios en el modelo hidráulico, es común el uso de Hidrogramas unitarios implementando la metodología de hidrogramas unitarios triangulares, conociendo el valor del caudal máximo de cada periodo de retorno asociado.

Para el análisis mostrado en este documento se cuenta con la evaluación de un sistema fluvial conformado por un drenaje principal y diferentes tributarios o afluentes. Partiendo de esta consideración, se ha optado por utilizar hidrogramas de caudal constante correspondiente al caudal pico de análisis y a lo largo de un tiempo determinado, ya que si se implementan hidrogramas triangulares en los cuales se tiene un caudal inicial y un caudal final igual a cero con la localización del pico en cierto tiempo de este, es posible que al momento de presentarse la simulación hidráulica el tramo aguas abajo de cada confluencia, no corresponda a la evaluación del pico en ambos drenajes, situación que se puede presentar por el desfase del tiempo al pico en ambos elementos. Ahora, si se realiza la simulación hidráulica ingresando un hidrograma constante con el caudal pico en cada elemento a lo largo del tiempo evaluado, se garantiza que en todo momento y en especial para el tramo aguas debajo de cada confluencia, se presente la tributación entre ambos elementos y la agregación del máximo caudal como aporte del sistema fluvial.

Otro análisis realizado consistió en definir el tiempo mínimo de simulación en el sistema fluvial, el cual consiste en determinar la duración de recorrido del flujo entre la entrada al sistema – superficie y la salida de este, análisis que depende de la longitud de estudio en los diferentes drenajes y de la velocidad promedio del flujo en su recorrido. Partiendo de esta información, se hace la construcción de hidrogramas de creciente de forma constante en cada elemento, para así evaluar su recorrido por toda la superficie de análisis.

Al ingresar los hidrogramas en cada una de las condiciones de borde en la zona aferente al territorio del distrito de Medellín, es necesario agregar adicionalmente la pendiente de la línea de energía, la cual se considera similar a la pendiente del fondo del terreno. Como condición de borde final, se ingresa la profundidad normal en el tramo aguas abajo, para lo cual es necesario contar con la pendiente de la línea de energía, la cual se iguala a la pendiente del fondo del canal en ese tramo. En síntesis, como condición de borde se utiliza el ingreso del hidrograma de creciente para el tramo aguas arriba de cada drenaje y una profundidad normal en el tramo aguas abajo, para lo cual se requiere utilizar la pendiente como se indicó previamente, incluyendo un análisis adicional que puede utilizar el control ejercido por el río Medellín para un caudal máximo de creciente de 10 años. Las condiciones de borde se indican en la Tabla 53.

Tabla 53. Condiciones de borde en los diferentes modelos elaborados.

ID	Corriente	Modelo	Longitud	Pendiente (m/m)	
			(m)	A. Arriba	A. Abajo
1	Q. Santa Elena	Modelo 5	13029,13	0,01469	0,01117
2	Q. La Picacha	Modelo 11	8279,99	0,09125	0,04067
3	Q. La Iguana	Modelo 14	15065,82	0,17000	TR10 Medellín
4	Q. Doña María	Modelo 1	16388,92	0,17820	0,33448
5	Q. La Presidenta	Modelo 4	4169,57	0,25659	0,01315
6	Q. La Poblada	Modelo 4	3687,44	0,16984	0,25405
7	Q. Ana Diaz	Modelo 10	6783,43	0,09935	0,02730
8	Q. La Hondita	Modelo 7	1063,40	0,34501	0,38308
9	Q. La Hueso	Modelo 9	8034,67	0,27278	0,00883
10	Q. Potreritos	Modelo 14	1099,93	0,27000	Confluencia
11	Q. La Volcana	Modelo 7	4372,78	0,28379	0,03840
12	Q. La Seca	Modelo 7	5144,98	0,46780	0,06810
13	Q. La Lejia	Modelo 13	3433,64	0,21674	0,34439
14	Q. La Escopetería	Modelo 4	3165,87	0,22710	0,26816
15	Q. La Sucia	Modelo 13	11224,70	0,08923	0,04958
16	Q. La Frisola	Modelo 13	6779,48	0,07279	0,09578
17	Q. La Aguacatala	Modelo 7	4710,02	0,21131	0,06766
18	Q. La Puerta - Borbollona	Modelo 14	1691,15	0,16000	Confluencia
19	Q. El Ñato	Modelo 6	2216,85	0,22729	0,09309
20	Q. La Astillera	Modelo 1	5304,67	0,28753	0,01518
21	Q. Altavista	Modelo 12	7806,06	0,06800	0,08196
22	Q. Zuñiga	Modelo 7	4859,77	0,34324	0,22118
23	Q. El Hato - La Guayaba	Modelo 14	1691,15	0,24000	Confluencia
24	Q. Canaveral - El Zancudo	Modelo 7	2212,69	0,27457	0,27398
25	Q. La Gómez	Modelo 14	2557,48	0,20000	Confluencia
26	Q. La Guayabala	Modelo 12	8321,26	0,11634	0,10852
27	Q. El Ahorcado	Modelo 7	4251,92	0,52653	0,02450
28	Q. la Rafita - Chorro Hondo	Modelo 6	2773,30	0,20199	0,20162
29	Q. La Limona	Modelo 3	4608,94	0,33116	0,08515
30	Q. Piedra Gorda	Modelo 8	2829,70	0,00630	0,00924
31	Q. Piedras Blancas	Modelo 8	5779,89	0,01583	0,02569
32	Q. Miserenga	Modelo 13	3626,40	0,32335	0,19417
33	Q. Malpaso	Modelo 14	5529,25	0,27000	TR10 Medellín
34	Q. La Puerta	Modelo 14	1452,64	0,16000	Confluencia
35	Q. La Pelahueso	Modelo 9	2406,22	0,03054	0,00740
36	Q. La Madera	Modelo 14	3873,09	0,13000	TR10 Medellín
37	Q. La Castro	Modelo 6	2355,99	0,10221	0,08577
38	Q. La Cantera Ramal Sur	Modelo 14	3025,74	0,16000	TR10 Medellín
39	Q. La Quintana	Modelo 14	3201,50	0,17000	TR10 Medellín
40	Q. La Chorrera - El Molino	Modelo 7	3713,22	0,29338	0,04236
41	Q. La Paulita	Modelo 7	2721,21	0,08373	0,04245

ID	Corriente	Modelo	Longitud	Pendiente (m/m)	
			(m)	A. Arriba	A. Abajo
42	Q. La Moñonga	Modelo 14	3253,11	0,24000	Confluencia
43	Q. La Bermejala	Modelo 7	3702,43	0,37917	0,01162
44	Q. La Leonarda	Modelo 9	4660,55	0,37987	0,05364
45	Q. La Guayaba	Modelo 11	522,73	0,46493	0,40344
46	Q. La Larga	Modelo 2	3944,01	0,07765	0,08550
47	Q. Agua Fria	Modelo 14	1546,07	0,29000	Confluencia
48	Q. La Despensa	Modelo 2	2940,15	0,16183	0,10995
49	Q. La Honda	Modelo 7	3847,67	0,31720	0,06365
50	Q. Minitas	Modelo 1	1151,09	0,10035	0,14971
51	Q. La Cañada	Modelo 3	912,96	0,15414	0,07051
52	Q. La Arenera	Modelo 14	3270,56	0,15000	Confluencia
53	Q. La García	Modelo 14	3261,74	0,20000	Confluencia
54	Q. La Zorrita	Modelo 3	1342,40	0,64216	0,21797
55	Q. La Potrera	Modelo 14	1099,93	0,27000	Confluencia
56	Q. La Mauala	Modelo 3	2691,82	0,21432	0,07123
57	Q. La Manguala	Modelo 3	5820,11	0,36617	0,09748
58	Q. La Rafita	Modelo 6	1452,10	0,13406	0,52748
59	Q. La Candela	Modelo 2	2820,18	0,67491	0,06420
60	Q. El Rosario	Modelo 8	3448,47	0,01788	0,07327

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Si bien las pendientes en algunas zonas de las áreas 2D pueden encontrarse por encima del 10%, se realiza una adecuada verificación de los resultados dados por el modelo mediante un proceso de calibración, analizando los niveles arrojados para los caudales de diseño, y que estos representen las condiciones reales en las corrientes.

9.3.1.4 Método de Simulación y Tiempo Computacional

HEC-RAS tiene la capacidad de realizar análisis de flujo inestable bidimensional con las ecuaciones de aguas poco profundas (SWE) o las ecuaciones de onda de difusión (DWE). HEC-RAS tiene tres conjuntos de ecuaciones que se pueden usar para resolver el flujo que se mueve sobre la malla computacional, las ecuaciones de onda de difusión; las ecuaciones originales de aguas poco profundas (SWE-ELM, que significa ecuaciones de aguas poco profundas, método euleriano-lagrangiano); y una nueva solución de ecuaciones de aguas poco profundas que es más conservadora en el momento (SWE-EM, que significa ecuaciones de aguas poco profundas, método euleriano). El SWE también tiene opciones para modelar turbulencias y efectos Coriolis.

Teniendo en cuenta que se realizará la modelación utilizando las ecuaciones de onda de difusión (DWE), se determina el valor del intervalo de tiempo, contando con un valor de tamaño de malla de entre 2,0 m y 6,0 m con una velocidad máxima promedio de 9,0 m/s. Esto permite asumir el tiempo de simulación hidráulica y el respectivo paso de tiempo. Adicionalmente, el programa permite definir el máximo y mínimo valor de Courant C considerando el tiempo a utilizar como base en la

computación, esto con el fin de mejorar los resultados para corrientes de alta pendiente, y por ello, se define un valor máximo y mínimo de 2,0 y 0,8, permitiendo optimizar el paso de tiempo de forma automatizada dentro del modelo. El resumen de la información utilizada en la generación de los modelos hidráulicos es mostrado en la Tabla 54.

Tabla 54. Paso de tiempo utilizado en los modelos hidráulicos.

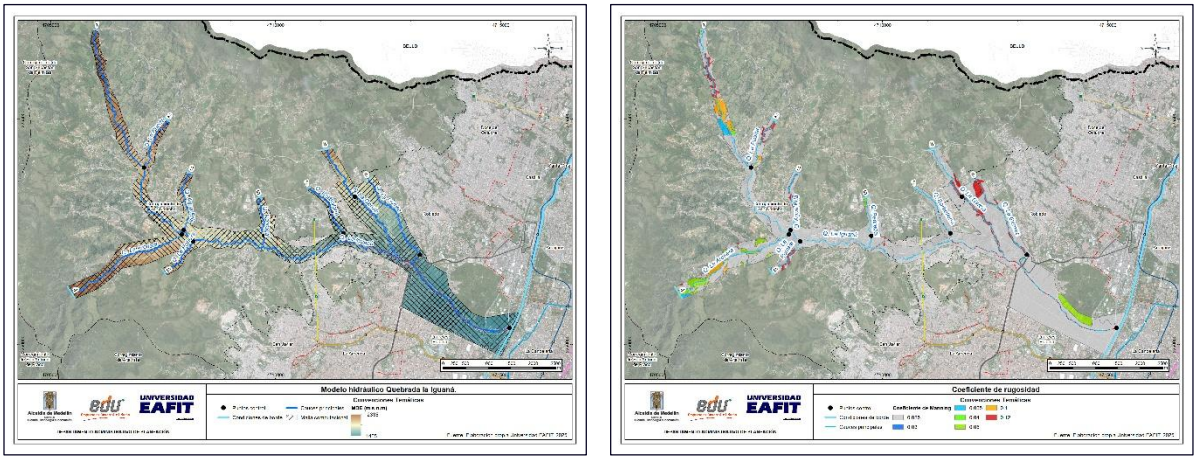
ID	Corriente	Modelo	Tiempo	Paso T	Courant
			(horas)	(segundos)	(adm)
1	Q. Santa Elena	Modelo 5	1,00	0,50	0,8 - 2,0
2	Q. La Picacha	Modelo 11	1,00	0,50	0,8 - 2,0
3	Q. La Iguana	Modelo 14	1,00	0,50	0,8 - 2,0
4	Q. Doña María	Modelo 1	1,00	0,50	0,8 - 2,0
5	Q. La Presidenta	Modelo 4	1,00	0,50	0,8 - 2,0
6	Q. La Poblada	Modelo 4	1,00	0,50	0,8 - 2,0
7	Q. Ana Diaz	Modelo 10	1,00	0,50	0,8 - 2,0
8	Q. La Hondita	Modelo 7	1,00	0,50	0,8 - 2,0
9	Q. La Hueso	Modelo 9	1,00	0,50	0,8 - 2,0
10	Q. Potreritos	Modelo 14	1,00	0,50	0,8 - 2,0
11	Q. La Volcana	Modelo 7	1,00	0,50	0,8 - 2,0
12	Q. La Seca	Modelo 7	1,00	0,50	0,8 - 2,0
13	Q. La Lejia	Modelo 13	1,00	0,50	0,8 - 2,0
14	Q. La Escopetería	Modelo 4	1,00	0,50	0,8 - 2,0
15	Q. La Sucia	Modelo 13	1,00	0,50	0,8 - 2,0
16	Q. La Frisola	Modelo 13	1,00	0,50	0,8 - 2,0
17	Q. La Aguacatala	Modelo 7	1,00	0,50	0,8 - 2,0
18	Q. La Puerta - Borbollona	Modelo 14	1,00	0,50	0,8 - 2,0
19	Q. El Ñato	Modelo 6	1,00	0,50	0,8 - 2,0
20	Q. La Astillera	Modelo 1	1,00	0,50	0,8 - 2,0
21	Q. Altavista	Modelo 12	1,00	0,50	0,8 - 2,0
22	Q. Zuñiga	Modelo 7	1,00	0,50	0,8 - 2,0
23	Q. El Hato - La Guayaba	Modelo 14	1,00	0,50	0,8 - 2,0
24	Q. Canaveral - El Zancudo	Modelo 7	1,00	0,50	0,8 - 2,0
25	Q. La Gómez	Modelo 14	1,00	0,50	0,8 - 2,0
26	Q. La Guayabala	Modelo 12	1,00	0,50	0,8 - 2,0
27	Q. El Ahorcado	Modelo 7	1,00	0,50	0,8 - 2,0
28	Q. la Rafita - Chorro Hondo	Modelo 6	1,00	0,50	0,8 - 2,0
29	Q. La Limona	Modelo 3	1,00	0,50	0,8 - 2,0
30	Q. Piedra Gorda	Modelo 8	1,00	0,50	0,8 - 2,0
31	Q. Piedras Blancas	Modelo 8	1,00	0,50	0,8 - 2,0
32	Q. Miserenga	Modelo 13	1,00	0,50	0,8 - 2,0
33	Q. Malpaso	Modelo 14	0,50	0,50	0,8 - 2,0
34	Q. La Puerta	Modelo 14	1,00	0,50	0,8 - 2,0
35	Q. La Pelahueso	Modelo 9	1,00	0,50	0,8 - 2,0
36	Q. La Madera	Modelo 14	0,50	0,20	0,8 - 2,0

ID	Corriente	Modelo	Tiempo (horas)	Paso T (segundos)	Courant (adm)
37	Q. La Castro	Modelo 6	1,00	0,50	0,8 - 2,0
38	Q. La Cantera Ramal Sur	Modelo 14	0,50	0,20	0,8 - 2,0
39	Q. La Quintana	Modelo 14	0,50	0,50	0,8 - 2,0
40	Q. La Chorrera - El Molino	Modelo 7	1,00	0,50	0,8 - 2,0
41	Q. La Paulita	Modelo 7	1,00	0,50	0,8 - 2,0
42	Q. La Moñonga	Modelo 14	0,50	0,50	0,8 - 2,0
43	Q. La Bermejala	Modelo 7	1,00	0,50	0,8 - 2,0
44	Q. La Leonarda	Modelo 9	1,00	0,50	0,8 - 2,0
45	Q. La Guayaba	Modelo 11	1,00	0,50	0,8 - 2,0
46	Q. La Larga	Modelo 2	1,00	0,50	0,8 - 2,0
47	Q. Agua Fria	Modelo 14	1,00	0,50	0,8 - 2,0
48	Q. La Despensa	Modelo 2	1,00	0,50	0,8 - 2,0
49	Q. La Honda	Modelo 7	1,00	0,50	0,8 - 2,0
50	Q. Minitas	Modelo 1	1,00	0,50	0,8 - 2,0
51	Q. La Cañada	Modelo 3	1,00	0,50	0,8 - 2,0
52	Q. La Arenera	Modelo 14	1,00	0,50	0,8 - 2,0
53	Q. La García	Modelo 14	1,00	0,50	0,8 - 2,0
54	Q. La Zorrita	Modelo 3	1,00	0,50	0,8 - 2,0
55	Q. La Potrera	Modelo 14	1,00	0,50	0,8 - 2,0
56	Q. La Mauala	Modelo 3	1,00	0,50	0,8 - 2,0
57	Q. La Manguala	Modelo 3	1,00	0,50	0,8 - 2,0
58	Q. La Rafita	Modelo 6	1,00	0,50	0,8 - 2,0
59	Q. La Candela	Modelo 2	1,00	0,50	0,8 - 2,0
60	Q. El Rosario	Modelo 8	1,00	0,50	0,8 - 2,0

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

9.3.2 Visualización de la geometría

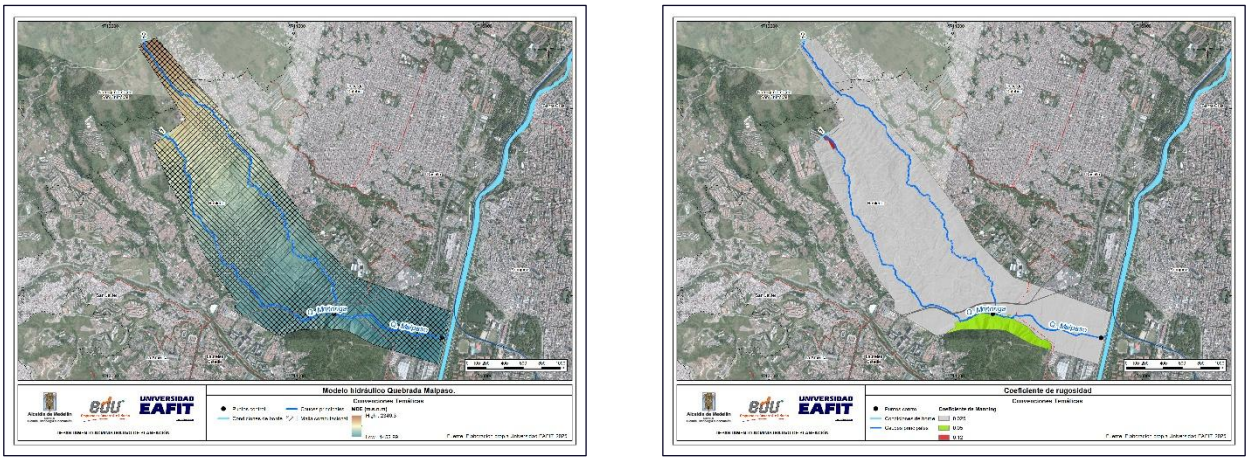
Con base en la información topográfica y fotografías aéreas se realiza la delimitación del área a modelar o región de estudio. Su extensión se definió con base en la calidad de la información topográfica, específicamente la identificación de zonas de iniciación de cauce a partir de las cuales es posible definir el inicio de la modelación hidráulica de los cauces. En la Ilustración 199 a Ilustración 205, se presentan varios de los modelos hidráulicos implementados en el análisis hidráulico del sistema fluvial que drena en el territorio del distrito de Medellín, específicamente para las cuencas priorizadas (60 cuencas).



Geometría Coeficientes de Rugosidad

Ilustración 199. Modelo Hidráulico Bidimensional implementado para la Quebrada La Iguaná

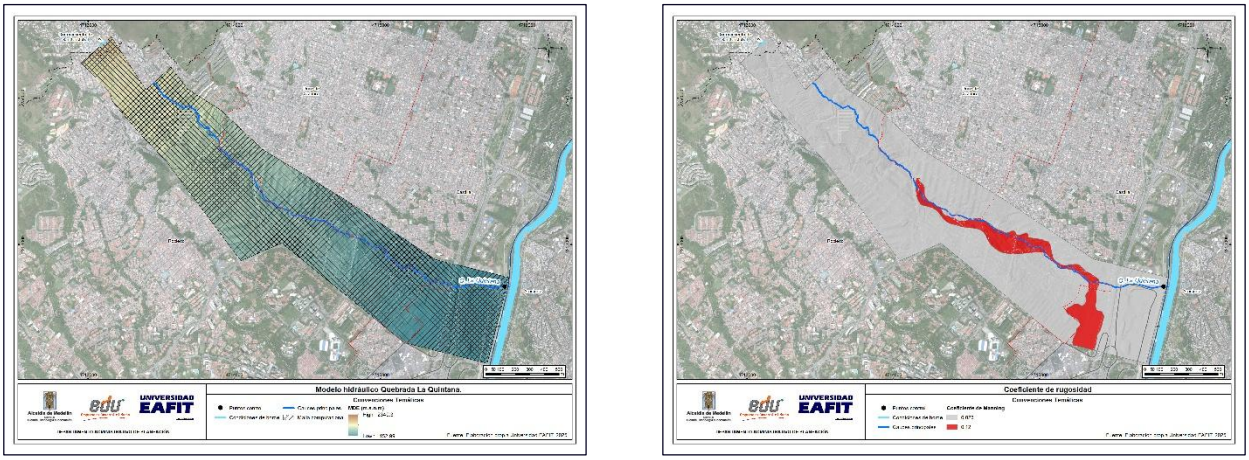
Fuente: Universidad EAFIT, 2025.



Geometría Coeficientes de Rugosidad

Ilustración 200. Modelo Hidráulico Bidimensional implementado para la Quebrada Malpaso

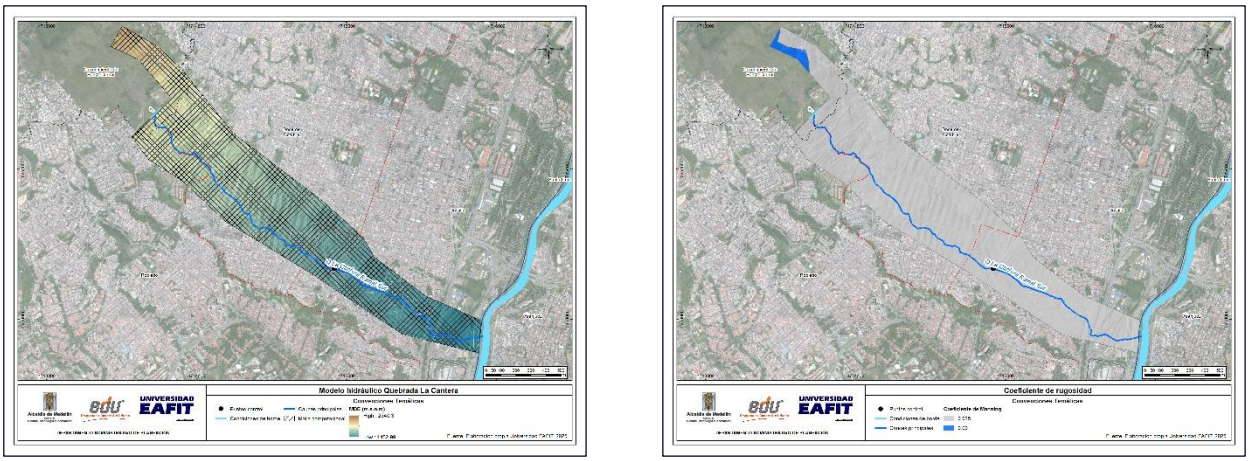
Fuente: Universidad EAFIT, 2025.



Geometría Coeficientes de Rugosidad

Ilustración 201. Modelo Hidráulico Bidimensional implementado para la Quebrada La Quintana

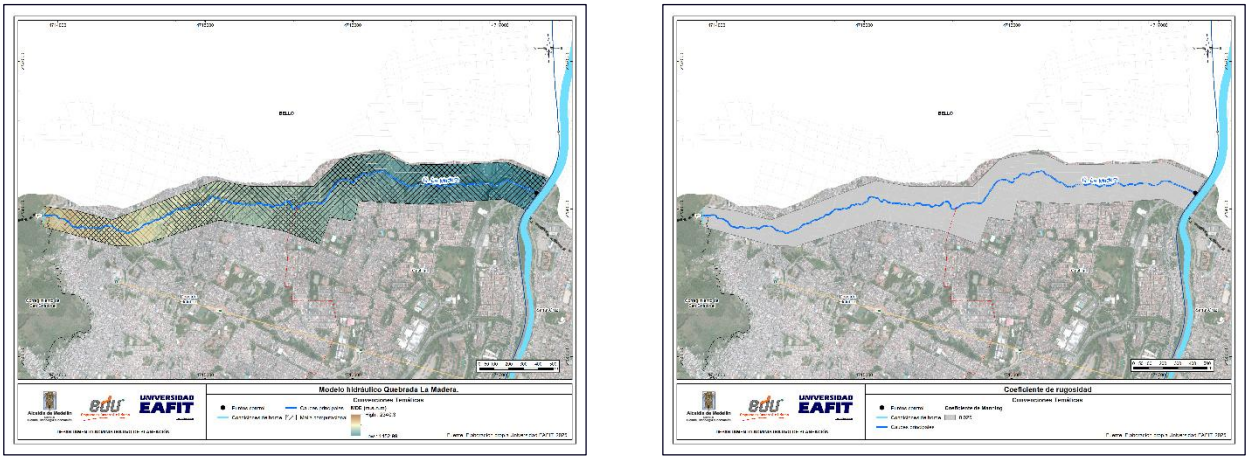
Fuente: Universidad EAFIT, 2025.



Geometría Coeficientes de Rugosidad

Ilustración 202. Modelo Hidráulico Bidimensional implementado para la Quebrada La Cantera (Ramal Sur)

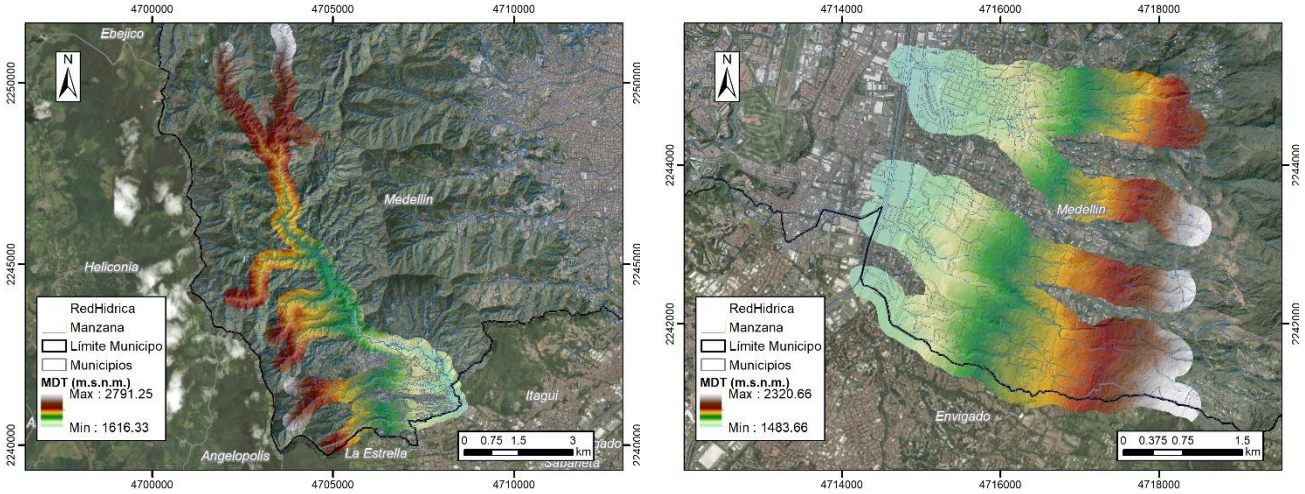
Fuente: Universidad EAFIT, 2025.



Geometría | Coeficientes de Rugosidad

Ilustración 203. Modelo Hidráulico Bidimensional implementado para la Quebrada La Madera

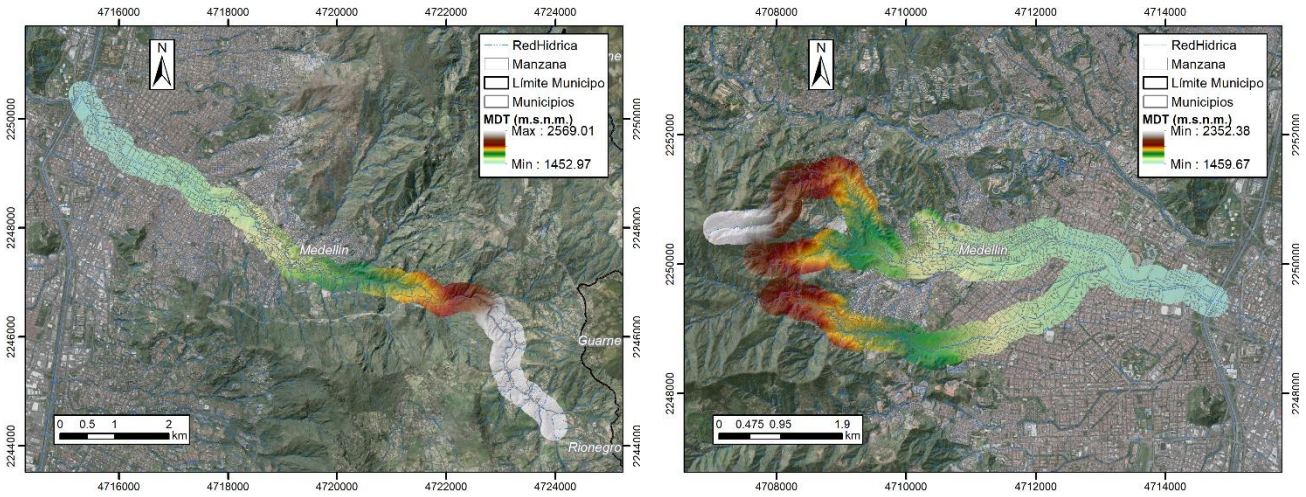
Fuente: Universidad EAFIT, 2025.



Geometría Q. Doña María | Geometría Q. La Presidenta

Ilustración 204. Modelo Hidráulico Bidimensional implementado para Q. Doña María y La Presidenta

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.



Geometría Q. Santa Elena

Geometría Q. La Hueso y Afluentes

Ilustración 205. Modelo Hidráulico Bidimensional implementado para Q. Santa Elena y La Hueso

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

9.3.3 Análisis Complementario Río Medellín

Tal como fue referenciado dentro del capítulo 9.2.3, se contó con los documentos: : ESTUDIO DETALLADO DE AMENAZA POR INUNDACIÓN DEL RÍO MEDELLÍN EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE LA CLARA Y LA QUEBRADA LA JABALCONA; ESTUDIO DE SUSCEPTIBILIDAD A LA OCURRENCIA DE AVENIDAS TORRENCIALES EN EL SECTOR AGUAS ARRIBA DE LA CLARA Y, MONITOREO DEL TRAMO CANAL IZADO DEL RÍO MEDELLÍN HASTA EL HATILLO EN EL VALLE DE ABURRÁ, desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá en junio de 2022 y ESTUDIO DE AMENAZA POR INUNDACIÓN DEL RÍO MEDELLÍN EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE LA QUEBRADA LA JABALCONA Y EL PUENTE DE LA MADRE LAURA, ASOCIADO A LA VARIACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS POR EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y CAMBIO EN EL USO DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO MEDELLÍN EN EL VALLE DE ABURRÁ, también desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y para octubre de 2023, los cuales permiten retomar los mapas de profundidad y velocidad para el periodo de retorno de 100 años del río Medellín y que se asocian al escenario requerido dentro de la zonificación de la amenaza por inundación, dando cumplimiento a lo recomendado en la Guía Metodológica para la Elaboración de Mapas de Inundación, IDEAM, 2017.

Partiendo de la información disponible y considerando el perímetro del Distrito Especial de Medellín, se puede contar con los mapas de profundidad y velocidad para esta corriente desde el ingreso del río Medellín al territorio, zona representada a partir de los resultados obtenidos por el estudio entre La Clara y la quebrada La Jabalcona, 2012 (zona sur), así como el tramo posterior a dicho sitio y que se retoma del estudio de la corriente comprendido entre la quebrada La Jabalcona y el Puente de La Madre Laura, 2023 (zona centro y parte norte). De acuerdo con la disponibilidad de información, es

necesario adelantar un análisis hidráulico complementario que permita la elaboración de los mapas de profundidad y velocidad para el caudal con periodo de retorno de 100 años, y para el tramo posterior al Puente de La Madre Laura hasta el límite inferior del Distrito Especial de Medellín, zona donde el río Medellín ingresa al municipio de Bello.

Es importante recordar que, de acuerdo con las características geomorfológicas del río, en cuanto a material aluvial, pendiente, laderas, entre otros aspectos, el drenaje solo presenta condiciones de respuesta ante eventos de inundación, sin considerarse un drenaje torrencial y por lo tanto, se debe complementar los análisis para el caudal con periodo de retorno de 100 años, escenario de crecientes del cual se retoman los mapas de profundidad y velocidad para los estudios previos. Dentro de este capítulo, se muestran las consideraciones técnicas tenidas en la elaboración del modelo hidráulico que complemente la información base dentro de la zonificación de la amenaza por inundación en el río Medellín.

9.3.3.1 Parámetros del Modelo Hidráulico Río Medellín

Inicialmente, para adelantar el modelo hidráulico del río Medellín como complemento a la información disponible (AMVA y UNAL, 2022 y AMVA y UNAL, 2023), es necesario contar con los caudales de diseño para esta corriente. Según el documento: ESTUDIO DE AMENAZA POR INUNDACIÓN DEL RÍO MEDELLÍN EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE LA QUEBRADA LA JABALCONA Y EL PUENTE DE LA MADRE LAURA, ASOCIADO A LA VARIACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS POR EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y CAMBIO EN EL USO DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO MEDELLÍN EN EL VALLE DE ABURRÁ, también desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y para octubre de 2023, se presentan los caudales máximos para los periodos de retorno de río Medellín que son usados en la modelación hidráulica y con la finalidad de zonificar la amenaza por inundación en el tramo de estudio, y donde si bien el punto final de análisis corresponde a la zona del Puente de La Madre Laura, se indica como caudal máximo para el periodo de retorno de 100 años un valor de 941,90 m^3/s relacionado con el sitio de la corriente a la altura de la descarga de la quebrada Santa Elena. En la Tabla 55, se indican los caudales máximos presentados dentro de AMVA y UNAL, 2023.

Tabla 55. Caudales máximos río Medellín en tramo centro y norte (m^3/s).

Punto Río Medellín	2.33	5	10	25	50	100
La Doctora	75,60	96,10	116,70	153,60	175,70	195,50
Doña María	70,30	81,00	89,80	102,80	112,10	123,10
Ayurá	84,70	113,90	141,20	184,60	215,00	250,10
La Presidenta	65,10	83,70	101,00	128,10	148,60	173,90
Altavista	41,30	49,90	58,40	74,80	87,60	102,70
La Picacha	9,51	10,83	12,08	13,51	14,39	15,13
La Hueso	21,69	24,67	27,52	30,79	32,81	34,47
La Iguaná	20,11	21,60	22,53	24,45	25,28	25,83
Santa Elena	16,49	17,70	18,47	20,05	20,72	21,17

Acumulados a Punto Específico del Río Medellín						
La Doctora	75,60	96,10	116,70	153,60	175,70	195,50
Doña María	145,90	177,10	206,50	256,40	287,80	318,60
Ayurá	230,60	291,00	347,70	441,00	502,80	568,70
La Presidenta	295,70	374,70	448,70	569,10	651,40	742,60
Altavista	337,00	424,60	507,10	643,90	739,00	845,30
La Picacha	346,51	435,43	519,18	657,41	753,39	860,43
La Hueso	368,20	460,10	546,70	688,20	786,20	894,90
La Iguaná	388,31	481,70	569,23	712,65	811,48	920,73
Santa Elena	404,80	499,40	587,70	732,70	832,20	941,90

Fuente: AMVA y UNAL, 2023.

Como se indicó previamente y según la Tabla 55, se tiene un caudal máximo para el periodo de retorno de 100 años de 941,90 m^3/s a la altura de la descarga de la quebrada Santa Elena. Sin embargo, se considera que a lo largo del recorrido entre dicho punto y la zona final de estudio como complemento (entre Puente de La Madre Laura y Límite del Distrito), puede presentarse el incremento de caudales por el aumento en el área de drenaje y la entrega de diferentes afluentes adicionales.

En el proceso de decisión de los caudales máximos para el río Medellín en el sitio de interés, se ha considerado adicionalmente el estudio: EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO DEL PROYECTO PARQUES DEL RÍO NORTE Y DIAGNÓSTICO HIDROLÓGICO, GEOGRÁFICO Y AMBIENTAL, desarrollado por la Universidad de Antioquia y SELVAR en 2024. En ese análisis, se realiza el cálculo del caudal máximo (periodo de retorno de 100 años), teniendo en consideración que actualmente la cobertura urbana cubre alrededor del 24% del área de esta cuenca y se espera un incremento de este porcentaje del área urbanizada hasta el 40% y determinados a la altura del Puente Acevedo. En la Tabla 56, se presenta el caudal de diseño utilizado en el estudio disponible UdeA y SELVAR, 2024.

Tabla 56. Caudales determinados para diferentes escenarios en Puente Acevedo.

TR	Caudales Máximos (m^3/s)			
	Observado	Simulado	Urbanizado 40%	Urbanizado Total
100	422,64	466,82	987,84	1841,57

Fuente: UDEA y SELVAR, 2024.

Para el caso específico de la simulación realizada por UdeA y SELVAR, 2024 con la cuenca urbanizada al 40% y urbanizada en la totalidad, se incluyó un análisis de cambio climático. Estos análisis contaron como sitio final de análisis el cruce del río Medellín con la vía Autopista Medellín – Bogotá, sitio similar al punto de salida de la corriente del perímetro relacionado con el Distrito Especial de Medellín.

Según este análisis, se tiene un caudal máximo para el periodo de retorno de 100 años y en la zona de interés, un valor de 987,84 m^3/s, considerando el escenario que contempla el crecimiento del área

urbanizada hasta en un 40% del área de la cuenca (16% por encima del porcentaje actual y que puede asumirse como una postura desfavorable). Este caudal es superior al definido por AMVA y UNAL, 2023 para el río en la zona de entrega de la quebrada Santa Elena y donde puede estimarse un incremento de 5,0% del caudal en el tramo adicional de recorrido hasta la zona de interés. Este incremente es de importancia toda vez que según el documento UDEA y SELVAR, 2024, solo se presenta el caudal para el periodo de retorno de 100 años y partiendo de dicho incremente del 5% y asumiendo que el incremento es similar para los diferentes periodos de retorno, puede estimarse el caudal para los periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años en el tramo aguas abajo del Puente de La Madre Laura y partiendo de los caudales máximos definidos en AMVA y UNAL, 2023 para dichos periodos de retorno. Los resultados son mostrados en la Tabla 57.

Tabla 57. Caudales máximos del río Medellín (m^3/s) para diferentes periodos de retorno y en tramo de interés como complemento.

Drenaje	Periodo de Retorno					
	2.33	**5**	**10**	**25**	**50**	**100**
Río Medellín	424,54	523,76	616,36	768,44	872,79	987,84

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Complementario a la determinación de los caudales máximos en el río Medellín, se tiene el modelo digital del terreno de todo el Distrito Especial de Medellín y correspondiente a la imagen LIDAR con resolución de 1,0 m por 1,0 m, sobre la cual se realizó la definición del área 2D o perímetro de análisis en la formulación de un modelo bidimensional en el programa HEC RAS v 6.7 Beta 3, tal y como fue desarrollado para los diferentes afluentes que han sido objeto de análisis y según la priorización de cuencas mostrada en capítulos previos. En la Ilustración 206, se muestra el detalle de la superficie del terreno y el tramo analizado para el río Medellín como análisis complementario aguas abajo del puente de La Madre Laura.

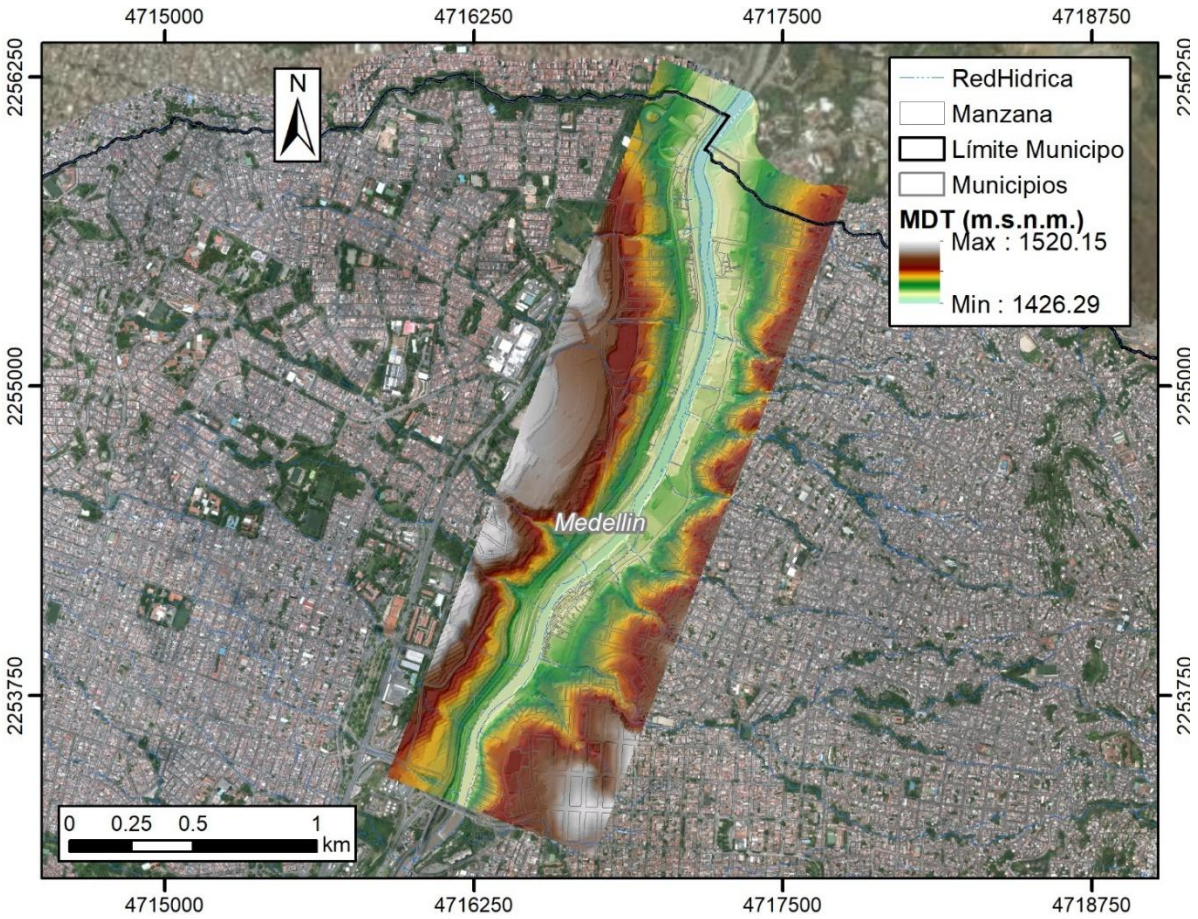


Ilustración 206. Superficie o terreno elaborado para el tramo de estudio, tramo complementario río Medellín.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

En la Tabla 58, se muestra los parámetros que definen la malla o estructuración de la superficie dentro del modelo bidimensional.

Tabla 58. Tamaño malla utilizada en el modelo 2D.

Parámetro	Valor
x celda MDT (m)	1.00
y celda MDT (m)	1,00
dx malla (m)	5,00
dy malla (m)	5,00
dx y dy breakline min (m)	2,50
dx y dy breakline max (m)	5,00

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Teniendo en cuenta la superficie 2D implementada dentro del modelo hidráulico y los caudales máximos determinados en el río Medellín y para los diferentes periodos de retorno, nuevamente se

considera la generación de un hidrograma de creciente donde las condiciones del hidrograma de entrada al modelo hidráulico son necesarias para adelantar el análisis hidráulico mediante un *Unsteady Flow Simulation* – Simulación de Flujo Inestable. En la Ilustración 207, se muestra la esquematización del tramo analizado y las secciones transversales elaboradas para la visualización y revisión de resultados, similar al desarrollo de los modelos hidráulicos desarrollados para los diferentes drenajes objeto de análisis en el presente estudio.

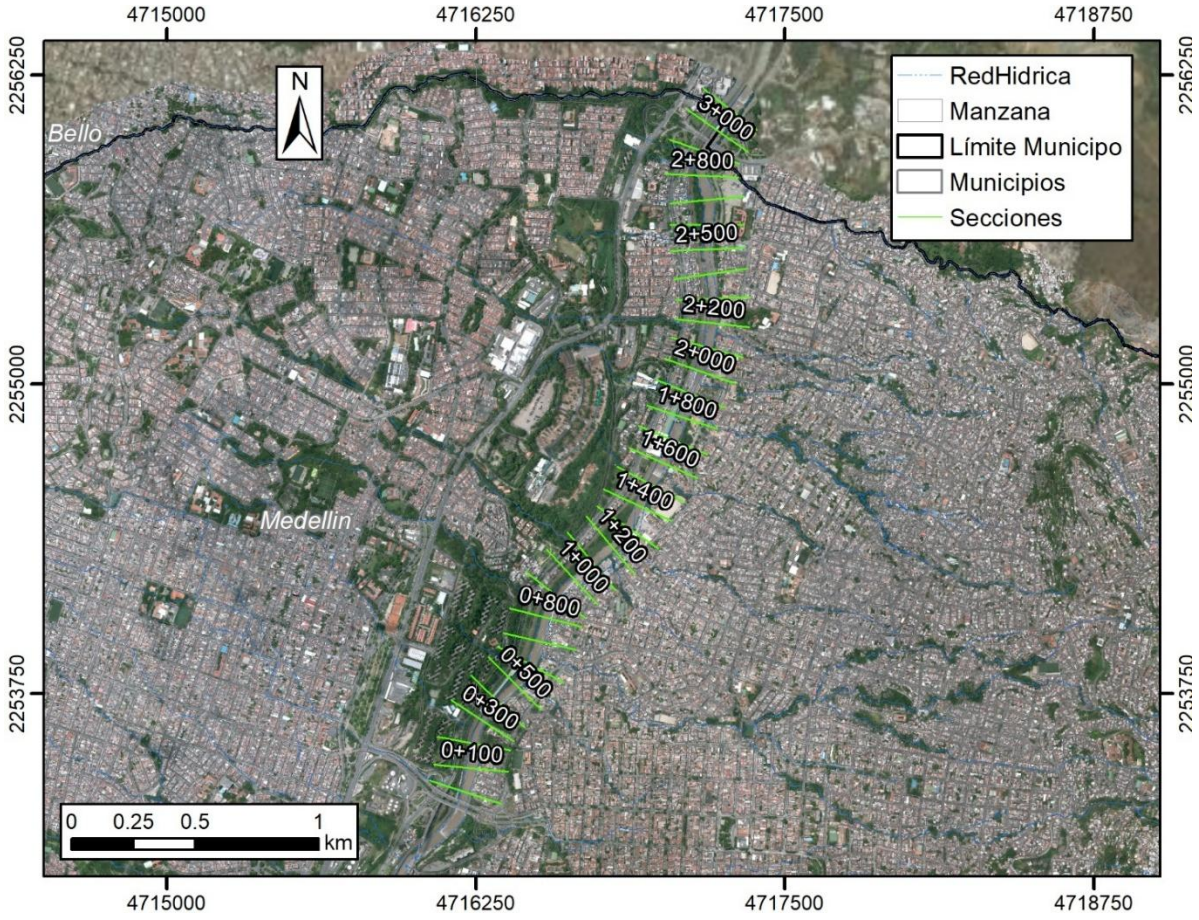


Ilustración 207. Esquema del tramo analizado y las secciones transversales de referencia para el tramo complementario del río Medellín.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Otro parámetro de entrada dentro del modelo bidimensional en el programa HEC RAS 6.7 Beta 3 corresponde al coeficiente de rugosidad de Manning y para lo cual se retoma la información indicada en la Tabla 52, donde se tiente un coeficiente para el lecho del río igual a 0,038 y que es determinado a partir del tamaño del material aluvial correspondiente a guijarros, arenas y gravas, valor que se encuentra de acuerdo a lo indicado en la literatura (Chow, 1994) y al Manual de Referencia del modelo HEC-RAS. También se dispone de áreas cubiertas por zonas verdes y tejido urbano, indicando valores de 0,045 y 0,075, respectivamente. Al igual que la información mostrada para toda el área del Distrito

Especial de Medellín, en la Ilustración 208, se presenta la distribución de las diferentes regiones que componen las coberturas vegetales en la zona de interés, con el respectivo valor del n de Manning.

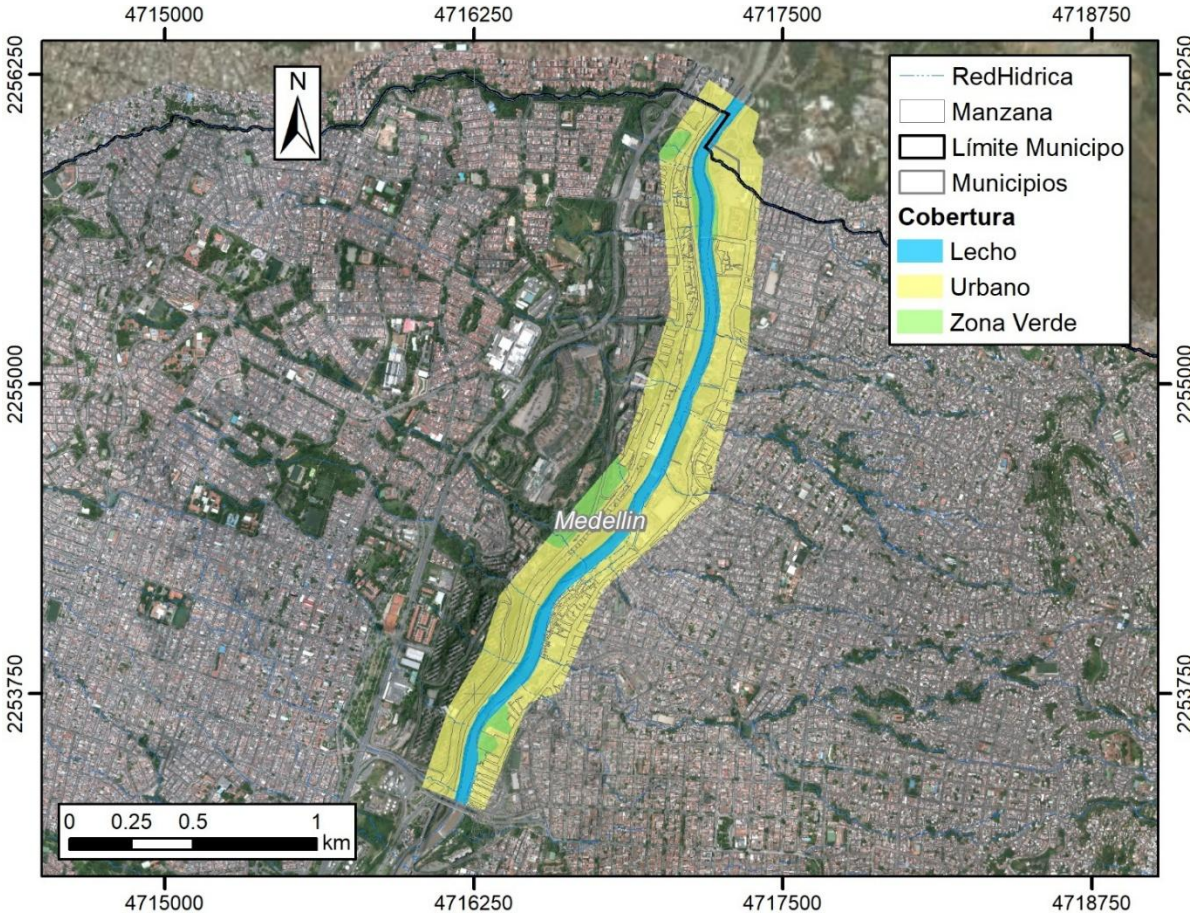


Ilustración 208. Regiones con n de Manning para el escenario evaluado, complemento río Medellín.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Para el caso del río Medellín en el tramo complementario (desde el puente de La Madre Laura y el límite del Distrito Especial de Medellín, y donde ingresa al municipio de Bello), también se escoge como condiciones de frontera externas, la entrada de un hidrograma justo en el sitio donde el flujo ingresa en la superficie o área 2D, y profundidad normal en la zona de salida del flujo, es decir, en la zona aguas abajo del área 2D. Se tienen los caudales de diseño máximo para el río Medellín y los periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años en el tramo de estudio complementario y donde se tiene mayor interés para la respuesta ante el caudal con periodo de retorno de 100 años requerido dentro del análisis de la zonificación de la amenaza por inundación y en cumplimiento con lo recomendado en la Guía Metodológica para la Elaboración de Mapas de Inundación, IDEAM, 2017. Para el análisis del río Medellín también se ha optado por escoger un hidrograma constante en todo el tiempo de simulación, esto con la finalidad de evaluar en el tramo de estudio el paso de la máxima

creciente – caudal de diseño. En este proceso, se tiene el sistema fluvial conformado por el río Medellín, contando como máxima longitud de estudio un recorrido de 3200 m y para lo cual, se hace un análisis de recorrido de 7000 m, superior al recorrido real, considerando, además, una velocidad promedio de 1 m/s, condición que permite determinar un tiempo de recorrido de hasta 116,67 min (01:56 hh:mm). Partiendo de esto, se asume un tiempo de simulación iniciando en tiempo 00:00 hh:mm y finalizando en 02:05 hh:mm, duración en la cual el caudal pico puede recorrer toda la superficie de estudio.

Para el análisis hidráulico del río Medellín en el tramo complementario, se agrega también la pendiente de la línea de energía, la cual se considera similar a la pendiente del fondo del terreno. Se ingresa la profundidad normal en el tramo aguas abajo, contando con la pendiente de la línea de energía que se iguala a la pendiente del fondo del canal en ese tramo, tal como se muestra en la Tabla 59.

Tabla 59. Pendientes en tramo aguas arriba y aguas abajo para río Aburrá / Medellín en tramo complementario.

Drenaje	S (m/m)	
	Arriba	Abajo
Río Aburrá / Medellín	0,002667	0,007800

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

También y para el tramo del río Medellín como análisis complementario y teniendo en cuenta que se realiza la modelación utilizando las ecuaciones de onda de difusión (DWE), se determina el valor del intervalo de tiempo contando con un valor de tamaño de malla de 2,50 m (zona de *breaklines* o refinamiento) y una velocidad máxima promedio de 7,0 m/s, determinando un valor óptimo de 0,714 segundos. Se utiliza entonces un delta T de 0,50 segundos para un tamaño de malla de 5,00 m por 5,00 m (con áreas de *breaklines* de hasta 2,50 m) y como tiempo de simulación, el definido por el hidrograma de diseño iniciando en un tiempo de 00:00 h:mm, y finalizando en 02:05 hh:mm.

9.3.4 Resultados

Luego de tener los datos e información relacionada para la simulación hidráulica en el HEC-RAS (rugosidad, caudal de diseño, condiciones de frontera y geometría), se analizó el comportamiento hidráulico de los diferentes drenajes localizados en el territorio del distrito de Medellín y que fueron objeto de priorización (60 cuencas), y así determinar los principales cambios entre las variables hidráulicas para los diferentes caudales analizados, incluyendo la quebrada La Chorrera que hace parte de la cuenca de la quebrada La Sucia, vertiente que hace parte del río Cauca. Se contó con los caudales máximos para los periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años y estos mayorados en 40%, así como sus respectivos hidrogramas, en el presente documento se muestran los niveles alcanzados por el caudal con periodo de retorno de 100 años y 500 + 40% sedimentos en

el instante del pico, y así evaluar el paso de la máxima creciente en todo el tramo de interés, información de relevancia en la evaluación de la amenaza por inundación y avenida torrencial. Como anexo al presente documento, se aporta de forma digital todos los archivos que componen el modelo bidimensional – 2D para los diferentes hidrogramas de estudio (Anexo 5). De ser necesario, se podrá evaluar el comportamiento de los caudales pico en para cada uno de los escenarios descritos previamente.

El presente estudio tiene como objeto la generación de los campos de profundidad y velocidad para los caudales con diferentes periodos de retorno, información base en la zonificación de la amenaza por inundación y avenida torrencial, definición que será presentada dentro de capítulos posteriores. Es de destacar que a partir del modelo 2D, el nivel del agua en la sección transversal puede contar con diferentes profundidades y que es la representación del paso de la masa de agua a través de las diferentes celdas. Dentro del modelo bidimensional, se cuenta con la capacidad de representar el tránsito hidráulico del flujo sobre las llanuras de inundación y sobre el canal natural, incluyendo además la determinación de sobre elevación del agua en las curvas, lo cual se aprecia claramente en las diferencias de altura a lo ancho de la sección transversal. Es de indicar que teniendo en cuenta que el análisis se hace bajo una evaluación en dos dimensiones – 2D del sistema fluvial, el modelo HEC RAS no genera resultados tabulares ya que no se cuenta con resultados y cálculos para secciones transversales, cálculos que se realizan celda a celda a través de toda el área 2D que compone el modelo hidráulico. Es de recordar que el cálculo de las variables hidráulicas se hace a partir de una superficie o terreno el cual se compone de celdas, y no en función de secciones transversales.

Con el aplicativo RasMapper que complementa el software HEC RAS v 6.7 Beta 3, se realizó la generación de los campos de profundidad y velocidad en toda la ventana de la simulación hidráulica, con especial interés en el instante donde se presenta el valor pico a través de todo el tramo de estudio. Esta información fue elaborada a partir de la superficie obtenida del levantamiento topográfico y que cuenta con un área suficiente para abarcar toda la extensión de la mancha de inundación. En la Ilustración 209 a Ilustración 216, se presenta el campo de profundidad y velocidad para los caudales con periodo de retorno de 100 años el cual es implementado dentro de la zonificación de la amenaza por inundación y para 500 años incrementado en 40% como límite superior en la zonificación de la amenaza por avenida torrencial, de acuerdo a las metodologías de zonificación de la amenaza que serán mostradas en capítulos posteriores.

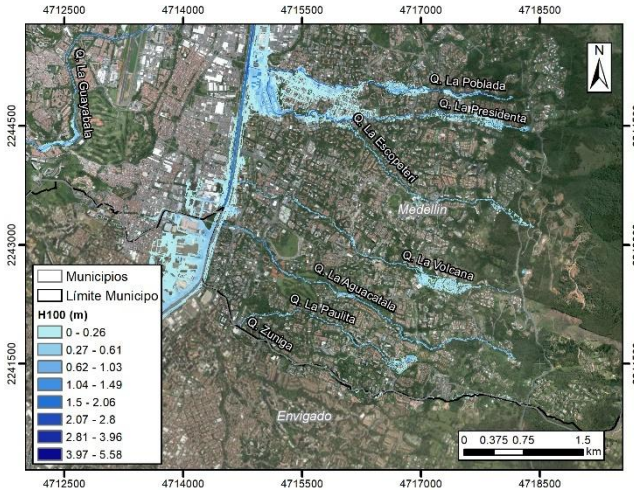
Tal como se ha mencionado en el presente capítulo, el objeto del presente estudio es la generación de los campos de profundidad y velocidad para cada uno de los caudales requeridos dentro del proceso de zonificación de la amenaza por inundación y avenidas torrenciales, por lo cual, se aporta dicha información dentro del Anexo 5 en el componente de hidráulica y como resultado de cada uno de los modelos hidráulicos implementados. Se podrá realizar la verificación de los componentes que conforman los diferentes modelos mediante los archivos que hacen parte del modelo hidráulico

realizado en el software HEC-RAS. Dentro de dicha información, se encuentra el terreno elaborado para la creación del área 2D, así como los perfiles o secciones transversales, uso del suelo o coeficiente de rugosidad de Manning, incluyendo todos los archivos que hacen parte del RAS Mapper que, en definitiva, consiste en el aplicativo que permite la visualización de todos los resultados del modelo.

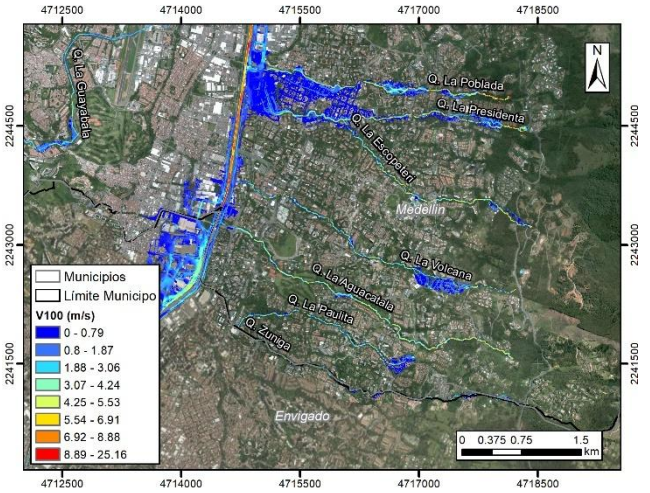
Es importante tener en consideración que la base geométrica implementada para el desarrollo de los estudios básicos de amenaza por inundación y avenidas torrenciales en el Distrito de Medellín correspondió a la imagen LIDAR elaborada y suministrada por el distrito con resolución de 1x1 m, donde se pudo contar con información parcial de los elementos estructurantes como vías, canales, entre otros aspectos. En cuanto a obras hidráulicas tales como puentes, box culvert, o similares, estas son representadas dentro de la imagen LIDAR en función de las vías o asentamientos localizados sobre ellas, sin conocer el detalle específico de las secciones transversales y para lo cual, dichas obras se reflejan como una obstrucción causada por el dique o conformación del terreno sobre las estructuras. Es por ello que, dentro de los análisis, se realizó la corrección con la finalidad de permitir el paso y continuidad del flujo a lo largo de los canales de análisis, y evitar la presencia de obstrucciones por dichas estructuras, elementos que pueden generar el desbordamiento del agua por el control e incremento del nivel hasta la cota superior de cada uno de estos sitios. Esta continuidad se realizó extrapolando la geometría de entrada y salida de la obra hidráulica, bajo suposiciones de transiciones lineales y pendientes uniformes, limitaciones descritas en el documento.

Dando cumplimiento a los lineamientos definidos dentro del Decreto 1077 de 2015 en cuanto al desarrollo de estudios básicos de amenaza por inundación y avenidas torrenciales, no es de estricto cumplimiento la modelación de obras hidráulicas, teniendo en cuenta la escala de trabajo para el desarrollo de estos estudios, donde la escala de precisión para la cartografía básica del Distrito de Medellín en suelo urbano es de 1:2.000 y para suelo rural de 1:5.000, como cartografía de mayor precisión y donde una estructura de cruce, corresponde a información asociada a escala de detalle y que no corresponde al objeto de los estudios desarrollados. Por tal razón, realizar el ajuste en la imagen LIDAR con resolución de 1x1 m, mediante la continuidad de los canales a través de obras de paso tipo box culvert o puentes, corresponde a un procedimiento adecuado.

La representación del comportamiento hidráulico de las fuentes de interés tiene como base la información de obras hidráulicas y esto corresponde a un análisis de detalle (estudio de detalle de amenaza por inundación y avenidas torrenciales) el cual no es objeto de los estudios básicos desarrollados. A pesar de lo anterior y teniendo como base la disponibilidad de información, se realizó la integración de obras hidráulicas, tales como la cobertura de la quebrada Santa Elena, Malpaso, entre otras, donde el Distrito de Medellín contó con información de estudios previos y con disponibilidad de detalles topográficos que permitieron el análisis de dichas obras dentro de los diferentes modelos hidráulicos elaborados.



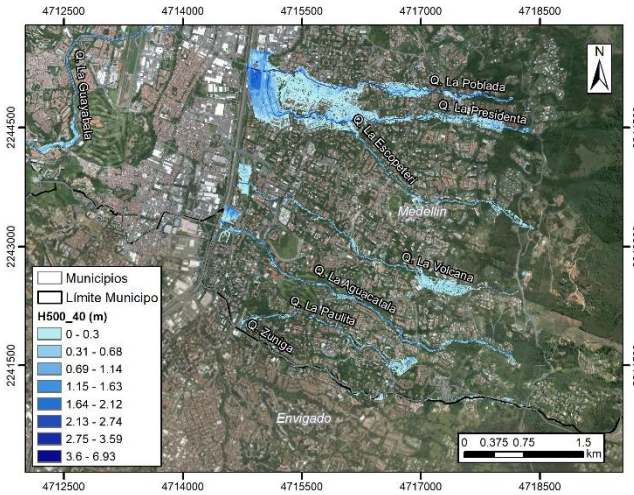
Profundidad TR100 Q. La Presidenta



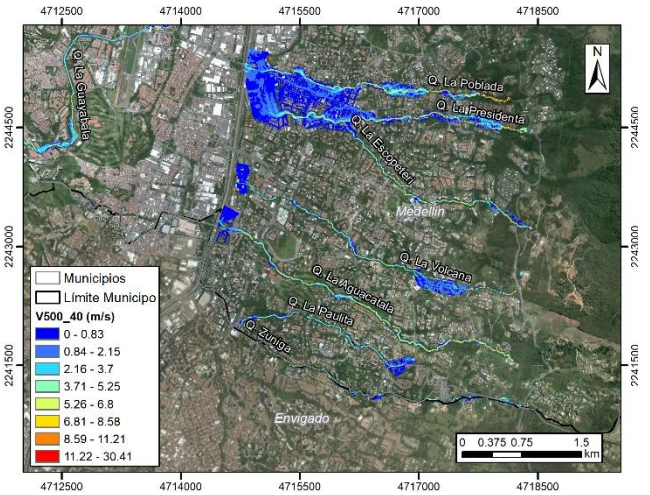
Velocidad TR100 Q. La Presidenta

Ilustración 209. Campo de profundidad y velocidad para TR100 en quebrada La Presidenta

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.



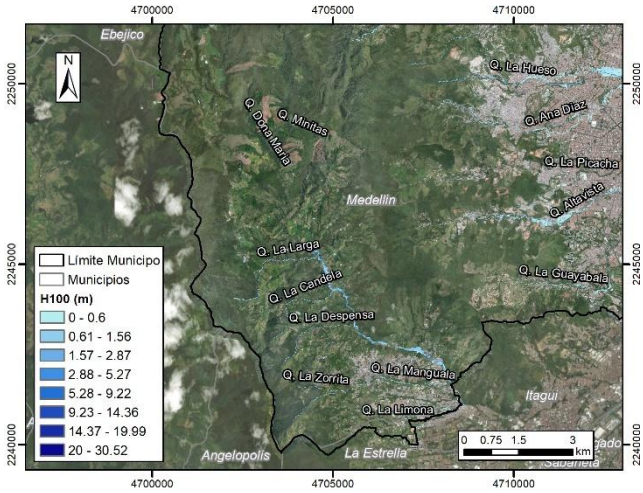
Profundidad TR500+40 Q. La Presidenta



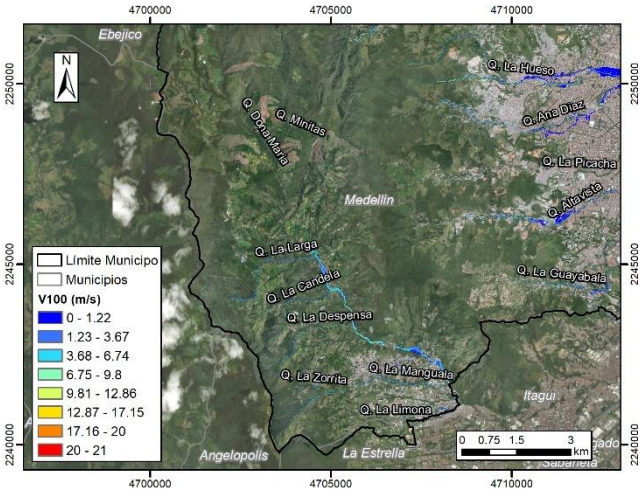
Velocidad TR500+40 Q. La Presidenta

Ilustración 210. Campo de profundidad y velocidad para TR500+40 en quebrada La Presidenta

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.



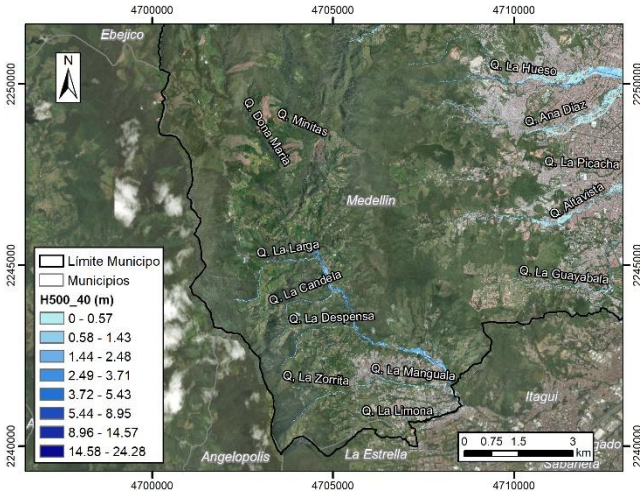
Profundidad TR100 Q. Doña María



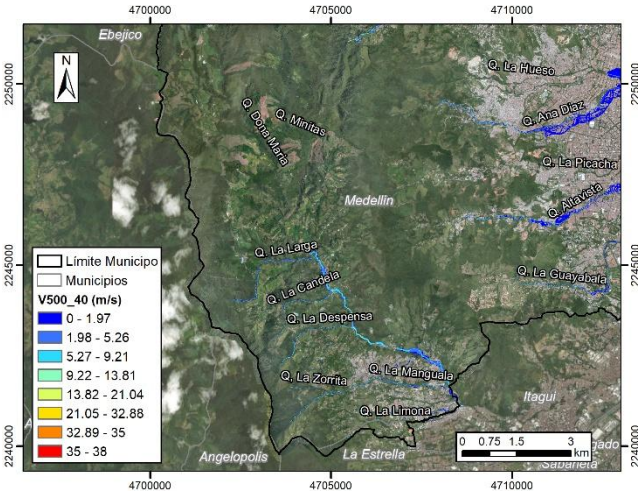
Velocidad TR100 Q. Doña María

Ilustración 211. Campo de profundidad y velocidad para TR100 en quebrada Doña María

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.



Profundidad TR500+40 Q. Doña María

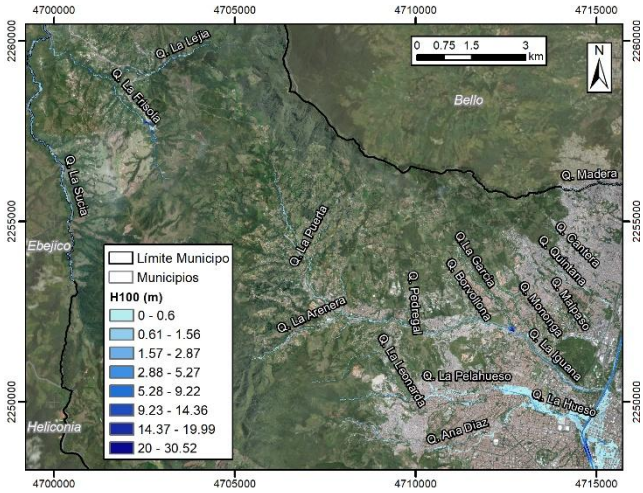


Velocidad TR500+40 Q. Doña María

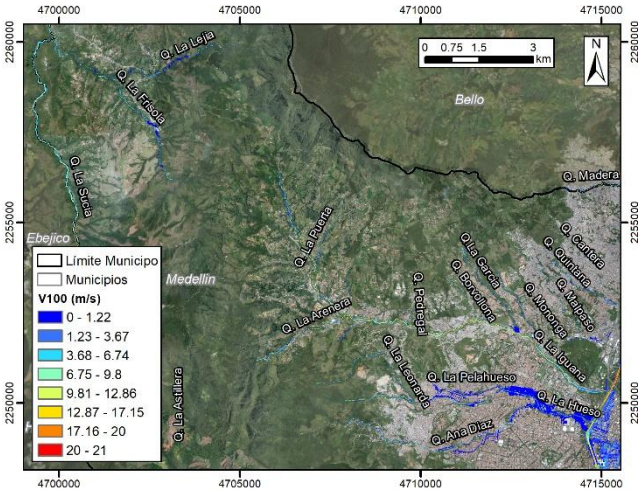
Ilustración 212. Campo de profundidad y velocidad para TR500+40 en quebrada Doña María

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Es de tener en cuenta que los análisis corresponden al desarrollo de modelos hidráulicos en función de la información topográfica que ha sido tomada de un levantamiento LIDAR disponible para el distrito de Medellín y con resolución de 1x1 m en la elaboración de estudio básico de amenaza. Por ello, los resultados obtenidos son acordes a la información disponible y el alcance del estudio.



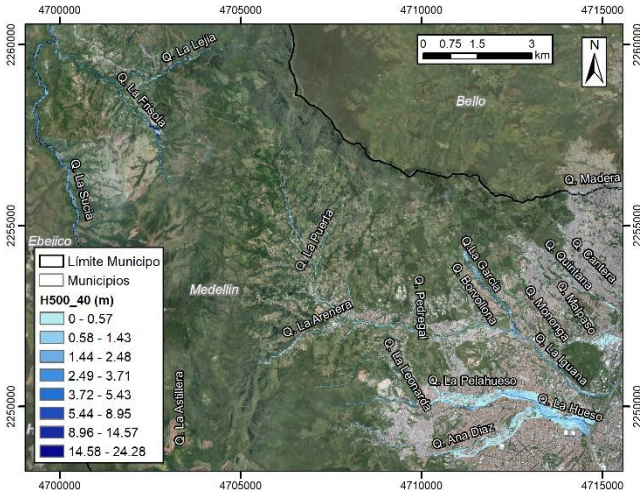
Profundidad TR100 Q. La Iguaná



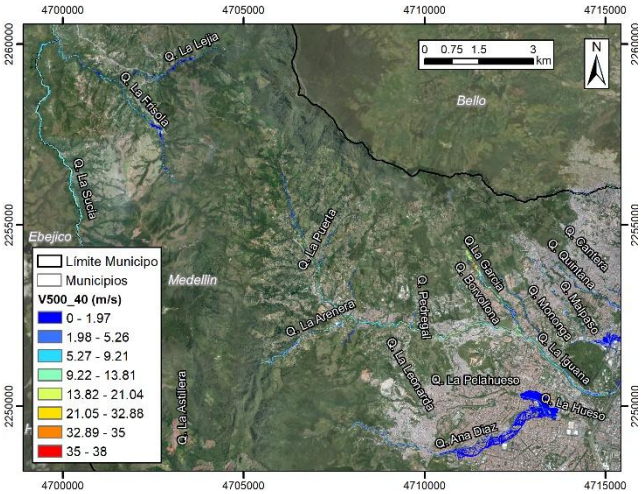
Velocidad TR100 Q. La Iguaná

Ilustración 213. Campo de profundidad y velocidad para TR100 en quebrada La Iguaná

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.



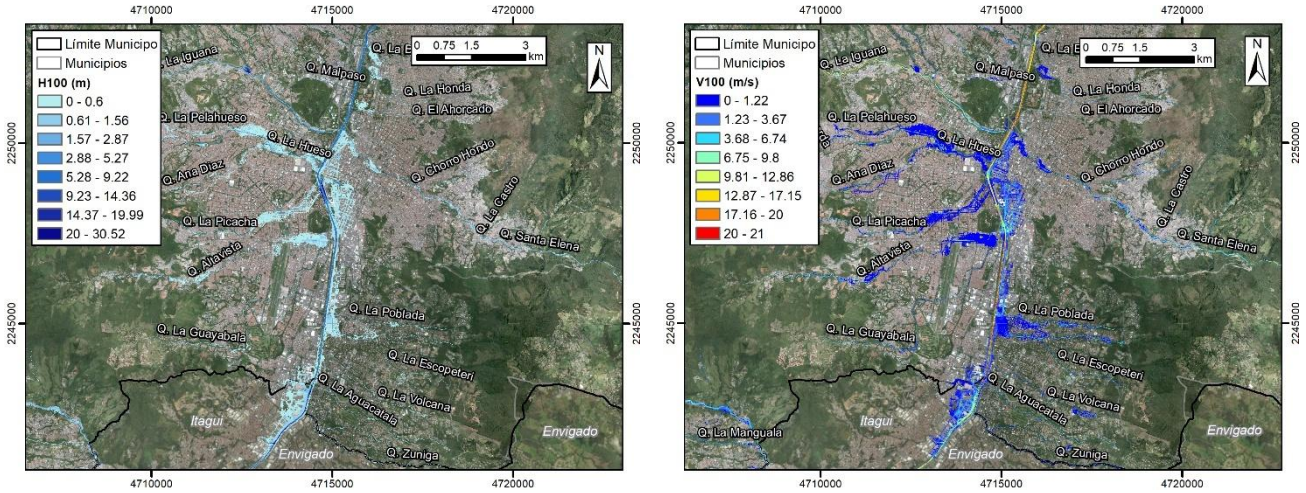
Profundidad TR500+40 Q. La Iguaná



Velocidad TR500+40 Q. La Iguaná

Ilustración 214. Campo de profundidad y velocidad para TR500+40 en quebrada La Iguaná

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.



Profundidad TR100 Q. Santa Elena

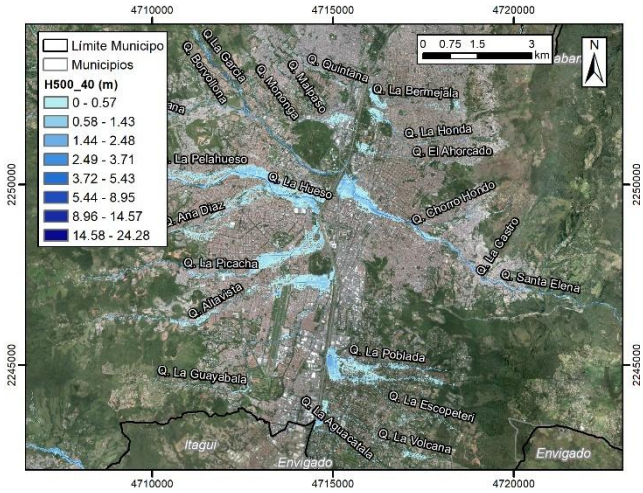
Velocidad TR100 Q. Santa Elena

Ilustración 215. Campo de profundidad y velocidad para TR100 en quebrada Santa Elena

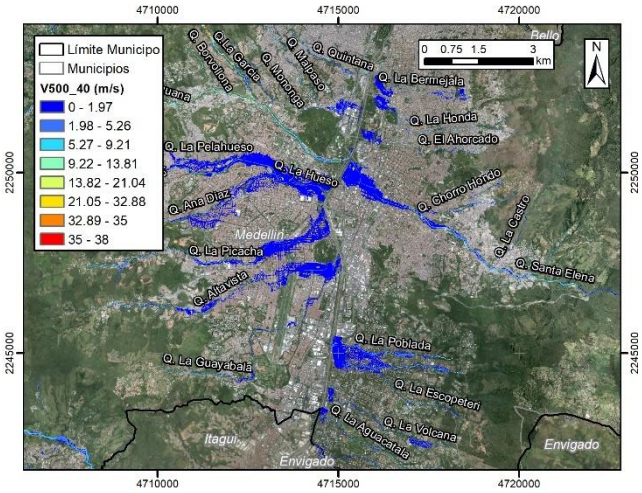
Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

9.3.5 Análisis de Resultados en Campos de Profundidad y Velocidad

En el análisis de la amenaza por inundación y avenidas torrenciales para el Distrito Especial de Medellín, se adelanta el estudio básico dando cumplimiento con Decreto 1807 de 2014, integrado en el Decreto 1077 de 2015. Como parte importante en los análisis realizados, se ha considerado como escenario para la zonificación de la inundación el caudal con periodo de retorno de 100 años y para la zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales los caudales máximos para los periodos de retorno de 25, 100 y 500 años incluyendo el volumen sólido como mayoración de los caudales líquidos en un 40%, escenarios que permiten cumplir con el documento: Guía Metodológica para la Elaboración de Mapas de Inundación, IDEAM, 2017 y la Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales, desarrollada por el Servicio Geológico Colombiano y la Pontificia Universidad Javeriana, (SGC, 2021).



Profundidad TR500+40 Q. Santa Elena



Velocidad TR500+40 Q. Santa Elena

Ilustración 216. Campo de profundidad y velocidad para TR500+40 en quebrada Santa Elena

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

A partir de lo anterior, se determinaron los campos de profundidad y velocidad para cada uno de los escenarios implementados y que en definitiva permite la zonificación de la amenaza por inundación y avenidas torrenciales, información que se muestra en capítulos posteriores. Se realizó un análisis de los resultados obtenidos para las diferentes manchas de inundación teniendo como base el escenario límite o extremo para la amenaza por inundación y avenidas torrenciales, en cuanto al periodo de retorno de 100 años y 500 años mayorado en 40%, respectivamente.

Para el escenario de inundación, se obtiene áreas ocupadas por el flujo de creciente que oscilan entre 0,0000178 km^2 y 0,65 km^2 siendo la cuenca con menor ocupación de flujo la quebrada Cantera Ramal Sur y la de mayor ocupación a la cuenca de la quebrada Doña María, con el 0,03% y 1,064% del área total de la cuenca, respectivamente. En este análisis, se determinó el área de influencia por inundación para cada una de las cuencas analizadas en el presente estudio y su relación con el área total de la cuenca, información que se muestra en la Tabla 60.

Tabla 60. Porcentaje del área de cuenca ocupada por inundación (TR100).

Nombre	Área cuenca (km2)	Área Inundación (km2)	Porcentaje
Q. Doña María	61,429	0,65333	1,064%
Q. La Sucia	76,360	0,47014	0,616%
Q. Piedras Blancas	23,635	0,42826	1,812%
Q. La Iguana	50,961	0,39870	0,782%
Q. La Hueso	24,749	0,35390	1,430%
Q. Altavista	25,309	0,27143	1,072%
Q. Santa Elena	35,562	0,25506	0,717%
Q. La Poblada	13,569	0,13755	1,014%
Q. La Picacha	10,685	0,12370	1,158%

Nombre	Área cuenca (km2)	Área Inundación (km2)	Porcentaje
Q. Ana Diaz	9,250	0,07843	0,848%
Q. La Frisola	13,677	0,07159	0,523%
Q. El Rosario	4,138	0,06157	1,488%
Q. La Manguala	3,969	0,05185	1,306%
Q. La Limona	3,234	0,04775	1,476%
Q. La Aguacatala	4,497	0,04389	0,976%
Q. La Presidenta	8,718	0,04313	0,495%
Q. Piedra Gorda	3,505	0,04277	1,220%
Q. La Larga	6,550	0,04231	0,646%
Q. La Chorrera - El Molino	5,962	0,04016	0,674%
Q. Miserenga	10,133	0,03755	0,371%
Q. La Bermejala	3,605	0,03673	1,019%
Q. Potreritos	10,239	0,03350	0,327%
Q. La Guayabala	4,677	0,02933	0,627%
Q. La Leonarda	2,132	0,02877	1,350%
Q. La Seca	3,657	0,02624	0,718%
Q. La Despensa	2,172	0,02455	1,130%
Q. Zuñiga	1,557	0,02371	1,522%
Q. La Candela	1,762	0,02325	1,319%
Q. La Honda	3,422	0,02032	0,594%
Q. La Paulita	1,236	0,02023	1,637%
Q. Malpaso	3,954	0,02007	0,507%
Q. La Gómez	1,719	0,01969	1,145%
Q. La Quintana	1,851	0,01738	0,939%
Q. la Rafita - Chorro Hondo	1,089	0,01638	1,505%
Q. La Moñonga	3,631	0,01526	0,420%
Q. La Mauala	0,483	0,01516	3,142%
Q. La Madera	3,384	0,01461	0,432%
Q. Minitas	1,268	0,01300	1,026%
Q. El Ahorcado	1,242	0,01279	1,029%
Q. El Ñato	3,417	0,01265	0,370%
Q. La Pelahueso	2,248	0,01226	0,545%
Q. La Puerta	3,714	0,00950	0,256%
Q. Canaveral - El Zancudo	1,139	0,00876	0,769%
Q. Agua Fria	1,311	0,00823	0,628%
Q. La Potrera	0,719	0,00744	1,036%
Q. La García	1,078	0,00731	0,679%
Q. La Volcana	0,715	0,00668	0,935%
Q. La Escopetería	1,934	0,00539	0,278%
Q. La Rafita	0,467	0,00511	1,094%
Q. La Zorrita	0,223	0,00426	1,915%
Q. La Puerta - Borbollona	2,948	0,00375	0,127%
Q. El Hato - La Guayaba	1,129	0,00295	0,261%
Q. La Cañada	0,092	0,00279	3,018%

Nombre	Área cuenca (km2)	Área Inundación (km2)	Porcentaje
Q. La Chorrera	0,222	0,00210	0,945%
Q. La Hondita	0,395	0,00208	0,527%
Q. La Arenera	1,448	0,00154	0,106%
Q. La Castro	4,317	0,00145	0,034%
Q. La Lejia	5,022	0,00046	0,009%
Q. La Astillera	7,461	0,00041	0,006%
Q. La Guayaba	0,100	0,00018	0,176%
Q. La Cantera Ramal Sur	0,640	0,00002	0,003%

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Un análisis similar fue realizado para el escenario de torrencialidad utilizando como referencia el caudal para el periodo de retorno de 500 años mayorado en 40% como límite superior dentro de la zonificación de la amenaza. Para este escenario, se tiene la cuenca con mayor porcentaje de flujo a la quebrada La Hueso con área ocupada de 1,89 km^2 correspondientes al 7,6% del área de drenaje en dicha cuenca y de menor área, la quebrada La Cantera Ramal Sur con 0,001 km^2 que equivalen a 0,01 % de su área de drenaje. En la Tabla 61, se presenta la relación del área ocupada en cada una de las cuencas evaluadas y por amenaza por avenida torrencial.

Tabla 61. Porcentaje del área de cuenca ocupada por avenida torrencial (TR500 + 40).

Nombre	Área cuenca (km2)	Área Avenida Torrencial (km2)	Porcentaje
Q. La Hueso	24,749	1,8905	7,64%
Q. Doña María	61,429	1,0670	1,74%
Q. Altavista	25,309	0,9494	3,75%
Q. La Poblada	13,569	0,8027	5,92%
Q. La Picacha	10,685	0,7329	6,86%
Q. Piedras Blancas	23,635	0,6476	2,74%
Q. La Iguana	50,961	0,6372	1,25%
Q. La Sucia	76,360	0,6069	0,79%
Q. Santa Elena	35,562	0,4008	1,13%
Q. Ana Diaz	9,250	0,3608	3,90%
Q. La Presidenta	8,718	0,2912	3,34%
Q. La Bermejala	3,605	0,1908	5,29%
Q. La Pelahueso	2,248	0,1607	7,15%
Q. El Rosario	4,138	0,1266	3,06%
Q. La Manguala	3,969	0,1020	2,57%
Q. La Chorrera - El Molino	5,962	0,0974	1,63%
Q. La Limona	3,234	0,0947	2,93%
Q. La Frisola	13,677	0,0883	0,65%
Q. La Astillera	7,461	0,0874	1,17%
Q. Piedra Gorda	3,505	0,0828	2,36%
Q. Malpaso	3,954	0,0755	1,91%
Q. La Aguacatala	4,497	0,0741	1,65%
Q. Potreritos	10,239	0,0677	0,66%

Nombre	Área cuenca (km2)	Área Avenida Torrencial (km2)	Porcentaje
Q. La Larga	6,550	0,0668	1,02%
Q. La Seca	3,657	0,0656	1,80%
Q. Zuñiga	1,557	0,0647	4,16%
Q. La Paulita	1,236	0,0631	5,10%
Q. La García	1,078	0,0630	5,84%
Q. la Rafita - Chorro Hondo	1,089	0,0614	5,63%
Q. Miserenga	10,133	0,0610	0,60%
Q. La Guayabala	4,677	0,0528	1,13%
Q. La Quintana	1,851	0,0491	2,65%
Q. La Moñonga	3,631	0,0467	1,28%
Q. La Leonarda	2,132	0,0465	2,18%
Q. La Volcana	0,715	0,0396	5,53%
Q. La Madera	3,384	0,0386	1,14%
Q. La Despensa	2,172	0,0383	1,77%
Q. La Candela	1,762	0,0375	2,13%
Q. La Honda	3,422	0,0373	1,09%
Q. La Gómez	1,719	0,0322	1,87%
Q. La Escopetería	1,934	0,0320	1,65%
Q. La Mauala	0,483	0,0307	6,35%
Q. La Rafita	0,467	0,0245	5,24%
Q. El Ahorcado	1,242	0,0229	1,84%
Q. El Ñato	3,417	0,0224	0,66%
Q. Canaveral - El Zancudo	1,139	0,0212	1,86%
Q. La Puerta	3,714	0,0191	0,51%
Q. Agua Fria	1,311	0,0155	1,18%
Q. La Potrera	0,719	0,0150	2,09%
Q. La Puerta - Borbollona	2,948	0,0144	0,49%
Q. La Castro	4,317	0,0135	0,31%
Q. La Zorrita	0,223	0,0125	5,62%
Q. La Cañada	0,092	0,0125	13,51%
Q. Minitas	1,268	0,0096	0,75%
Q. El Hato - La Guayaba	1,129	0,0086	0,77%
Q. La Chorrera San Antonio Prado	0,222	0,0083	3,75%
Q. La Hondita	0,395	0,0053	1,35%
Q. La Guayaba	0,100	0,0038	3,86%
Q. La Arenera	1,448	0,0025	0,17%
Q. La Lejia	5,022	0,0005	0,01%
Q. La Cantera Ramal Sur	0,640	0,0001	0,01%

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

En general, puede observarse que para las zonas altas de las cuencas y donde se presenta el drenaje a través de las laderas, el flujo se encuentra confinado dentro de las vertientes sin evidencias de grandes áreas de inundación, tanto para el análisis de la amenaza por inundación como para

avenidas torrenciales. Esta situación presenta una condición diferente en los tramos donde los drenajes ingresan al área urbana del distrito especial de Medellín, que dada la existencia de estructuras hidráulicas tales como canales, obras de paso, entre otras, conllevan al desbordamiento del agua por problemas de capacidad hidráulica, causando el paso del flujo por vías y terrenos adyacentes a los drenajes analizados, para lo cual es importante destacar que los análisis realizados se asocian a un estudio básico en función de información topográfica desarrollada mediante una imagen LIDAR con resolución de 1,0 m por 1,0 m.

Como parte de los análisis realizados y en especial para el escenario de inundación, se ha integrado la información de la profundidad y velocidad del río Medellín que ha sido obtenida dentro de los documentos: ESTUDIO DETALLADO DE AMENAZA POR INUNDACIÓN DEL RÍO MEDELLÍN EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE LA CLARA Y LA QUEBRADA LA JABALCONA; ESTUDIO DE SUSCEPTIBILIDAD A LA OCURRENCIA DE AVENIDAS TORRENCIALES EN EL SECTOR AGUAS ARRIBA DE LA CLARA Y, MONITOREO DEL TRAMO CANAL IZADO DEL RÍO MEDELLÍN HASTA EL HATILLO EN EL VALLE DE ABURRÁ, desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá en junio de 2022, y ESTUDIO DE AMENAZA POR INUNDACIÓN DEL RÍO MEDELLÍN EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE LA QUEBRADA LA JABALCONA Y EL PUENTE DE LA MADRE LAURA, ASOCIADO A LA VARIACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS POR EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y CAMBIO EN EL USO DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO MEDELLÍN EN EL VALLE DE ABURRÁ, también desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y para octubre de 2023. Estos análisis fueron complementados con el estudio hidráulico del río Medellín para el tramo aguas abajo del puente de la Madre Laura, permitiendo contar con los mapas de profundidad y velocidad para el periodo de retorno de 100 años y en toda la longitud del río Medellín al interior del Distrito Especial de Medellín.

9.4 AMENAZA POR INUNDACIÓN

El IDEAM define las inundaciones como fenómenos hidrológicos recurrentes potencialmente destructivos, que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente. Se producen por lluvias persistentes y generalizadas que generan un aumento progresivo del nivel de las aguas contenidas dentro de un cauce superando la altura de las orillas naturales o artificiales, ocasionando un desbordamiento y dispersión de las aguas sobre las llanuras de inundación y zonas aledañas a los cursos de agua normalmente no sumergidas.

Para el análisis de la amenaza por inundaciones se utiliza la metodología elaborada por la Agencia Federal para Manejo de Emergencias de los Estados Unidos, que hace parte de la guía denominada "*Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping"* del año 2014, la cual sirve para la implementación eficaz y eficiente del estándar de análisis de riesgo de inundación y su respectivo mapeo. En esta categoriza la amenaza por el efecto combinado de la profundidad y la velocidad del flujo, en Bajo, Medio, Alto, Muy Alto y Riesgo Extremo (IDEAM, 2017).

Para elaborar el mapa de amenaza por inundación se usó una escala 1:2.000, además, se utilizaron unas reglas adicionales al multiplicar la velocidad por la profundidad, teniendo en cuenta los límites superiores de la profundidad y la velocidad para cada categoría de amenaza. El IDEAM, 2017 presenta la siguiente categorización simplificada de la amenaza como el producto de la velocidad por la profundidad; sin embargo, se pueden usar otras categorías (

Tabla *62*).

Tabla 62. Tabla de categorización simplificada de la amenaza como el producto de la velocidad por la profundidad.

Categoría de severidad de inundación	**Rango de profundidad * velocidad (pies²/seg)**	**Rango de profundidad * velocidad (m²/seg)**
Baja	<2.2	<0.2
Media	2.2 – 5.4	0.2 – 0.5
Alta	5.4 – 16.1	0.5 – 1.5
Muy Alta	16.1 – 26.9	1.5 – 2.5
Extrema	>26.9	>2.5

Fuente: Adaptado de IDEAM, 2017.

Para el caso de interés, esta categorización fue ajustada de acuerdo con el Decreto 1077 de 2015 en amenaza baja, media y alta, utilizando los rangos <0.2; de 0.2 a 0.5; y >0.5 respectivamente (las categorías muy alto y extremo se encuentran contenidas en la categoría de amenaza alta). Como resultado de los análisis hidrológicos, modelamiento hidráulico, se zonificaron las diferentes áreas en zonas con amenaza alta, zonas con amenaza media y zonas con amenaza baja.

Para el presente análisis fue utilizada la mancha de inundación con periodo de retorno de 100 años teniendo en cuenta los resultados de este estudio, se presenta la zonificación de amenazas para las cuencas priorizadas. Además, se presenta la zonificación detallada para cada una de las quebradas en la carpeta 04_Imagenes – Imágenes Detalle del EBA.

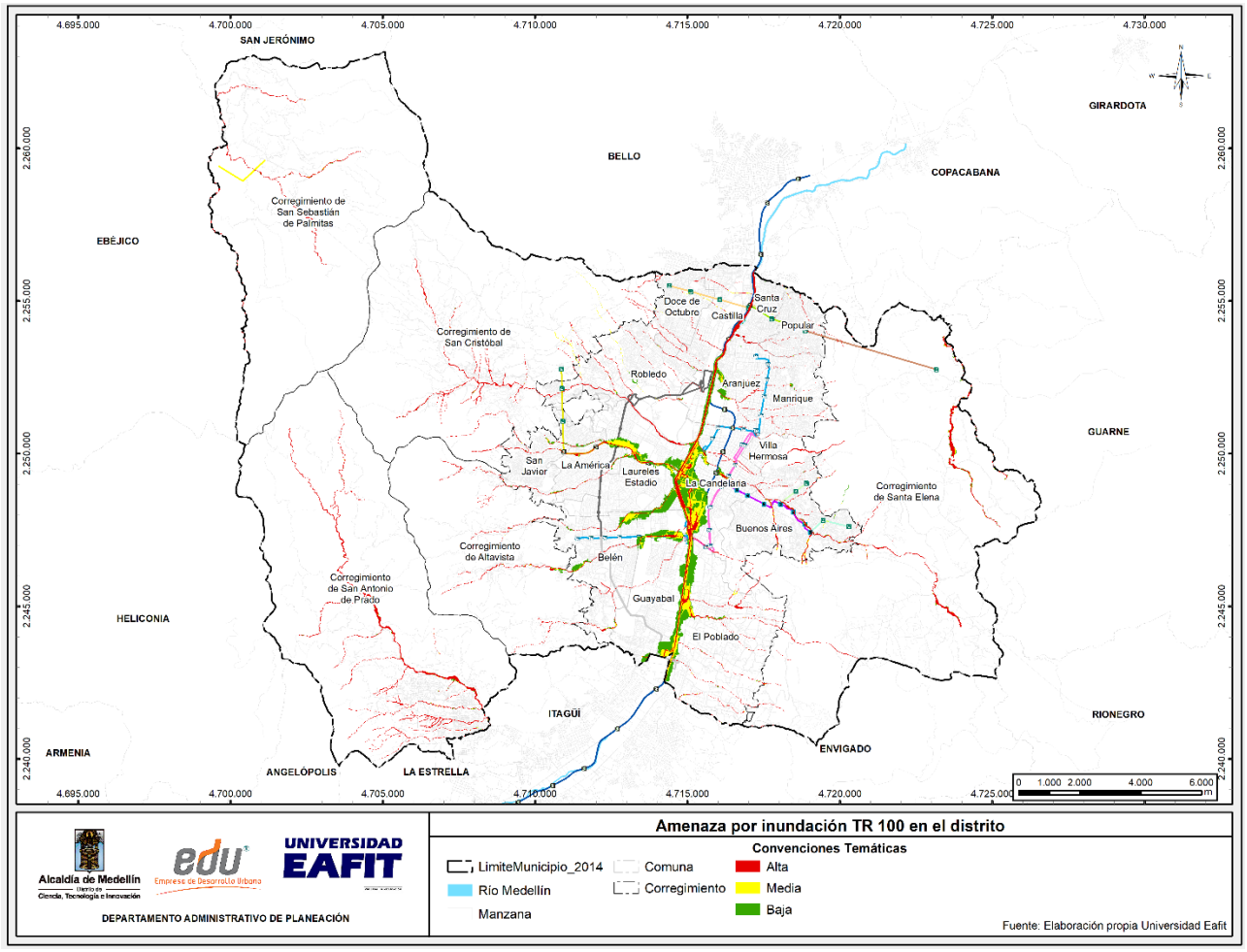


Ilustración 217. Zonificación de la amenaza por inundación en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Amenaza Alta: corresponde a las zonas donde el producto de la altura de la lámina de agua y la velocidad es mayor a 0,5 m^2/s, ocupa el 50,75% del área cubierta por la mancha de inundación del periodo de retorno de 100 años determinada por los análisis hidrológicos e hidráulicos, correspondiente a 575,14 ha. Estas corresponden a la zona central de los cauces de las quebradas analizadas de manera continua en toda el área de análisis, donde las condiciones topográficas favorecen los procesos de acumulación de materiales.

Amenaza Media: corresponde a las zonas donde el producto de la altura de la lámina de agua y la velocidad se encuentra entre 0,2 y 0,5 m^2/s, ocupa el 17,17% del área cubierta por la mancha de inundación del periodo de retorno de 100 años determinada por los análisis hidrológicos e hidráulicos, correspondiente a 194,59 ha. Esta categoría presenta distribución baja y variada, encontrándose como un pequeño borde asociado a la zona de amenaza anteriormente descrita.

Amenaza Baja: corresponde a las zonas donde el producto de la altura de la lámina de agua y la velocidad es menor a 0,2 m^2/s, ocupa el 32,08% del área cubierta por la mancha de inundación del periodo de retorno de 100 años determinada por los análisis hidrológicos e hidráulicos, correspondiente a 363,61 ha.

9.5 AMENAZA POR INUNDACIÓN EN AFLUENTES CON EVIDENCIA DE EVENTOS QUE NO FUERON OBJETO DE MODELACIÓN HIDRÁULICA PRIORIZADA

La zonificación de amenaza por inundación en el territorio del Distrito de Medellín se sustenta de manera principal en modelaciones hidráulicas, en concordancia con los lineamientos establecidos en el artículo 2.2.2.1.3.2.1.2 del Decreto 1077 de 2015, que compiló el artículo 9 del Decreto 1807 de 2014. No obstante, la red hídrica del Distrito comprende una diversidad de afluentes y drenajes en los cuales la modelación hidráulica detallada no resulta técnicamente viable en el marco de un estudio básico, debido a la escala del análisis, la limitada disponibilidad de información hidrológica e hidráulica, o las condiciones físicas particulares del cauce, tales como tramos en cobertura hidráulica u ocupados en su sección por construcciones irregulares.

Con el propósito de asegurar la cobertura integral de la zonificación de amenaza de inundación en el territorio, condición habilitante para la revisión del Plan de Ordenamiento Territorial conforme al Decreto 1077 de 2015, se adoptó una jerarquía metodológica fundamentada en el principio de considerar información con mayor soporte técnico disponible. Dicho principio reconoce que los distintos tramos del territorio cuentan con niveles heterogéneos de información técnica y, en consecuencia, demandan métodos diferenciados que preserven el rigor de la categorización de amenaza bajo umbrales comparables y consistentes con el marco normativo vigente.

Por tanto, se determinó la amenaza por inundación en aquellos afluentes y drenajes para los cuales se cuenta con evidencia histórica de ocurrencia de eventos de inundación, registrada a través de la base de datos del Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres (DAGRD) y de la red de monitoreo del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA), y que no fueron objeto de modelación hidráulica. Para estos tramos, se aplicó la metodológica descrita en el Anexo 1, ordenada en función de la jerarquía técnica decreciente teniendo en cuenta cinco niveles. La selección del método aplicado a cada tramo quedó documentada en la base de datos del estudio, lo que garantiza la trazabilidad integral del procedimiento:

- Nivel 1. Estudios Básicos de Amenaza y estudios de detalle existentes
- Nivel 2. Modelaciones hidráulicas del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá
- Nivel 3. Planes Integrales de Ordenamiento y Manejo de Microcuencas

- Nivel 4. Método geomorfológico complementado con caudales del Estudio Básico de Amenazas
- Nivel 5. Zonificación POT 2014 y Tramos de cauce en cobertura hidráulica

Como insumo previo a la aplicación de la jerarquía metodológica, se identificaron las zonas de interés del territorio mediante la integración de dos fuentes institucionales de información. En primer lugar, se consultó la base de datos de evaluaciones técnicas del Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres (DAGRD) del Distrito de Medellín, en la cual se registran los sitios donde se han presentado eventos de inundación documentados. Estos registros constituyen evidencia histórica de ocurrencia del fenómeno y permiten identificar los tramos del territorio en los cuales la amenaza se ha manifestado de forma efectiva.

En segundo lugar, se incorporó la red de sensores de nivel instalados por el Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA), red que en numerosos casos coincide con puntos previamente priorizados por el DAGRD. La instalación de instrumentación en estos puntos responde a la identificación técnica previa de condiciones de amenaza que justificaron la implementación de sistemas de monitoreo y alerta temprana.

9.5.1 Nivel 1 Estudios Básicos de Amenaza y estudios de detalle existentes

En este nivel se verificó la cobertura del tramo por las modelaciones hidráulicas contenidas en el Estudio Básico de Amenazas – EBA del Distrito de Medellín, que constituye la referencia técnica más actualizada para el ámbito distrital, así como por los estudios de detalle adoptados por el Distrito a la fecha. Los drenajes que fueron zonificados por los estudios se presentan en la Tabla 63.

Tabla 63 Listado de drenajes analizados por los estudios básicos y de detalle

Drenaje	Fuente estudio
La Seca	EBA
La Seca 1	ED - Estudio unidos por el Agua - Circuito Santo Domingo - La Avanzada
Q. Blanquizala	ED - Estudio unidos por el Agua - Circuito Santo Domingo - La Herrera
Q. Granizal o La Herrera	ED - Estudio unidos por el Agua - Circuito Santo Domingo - La Herrera
Q Caravieja o Villaguadalupe	ED - Estudio unidos por el Agua - Circuito Santo Domingo - La Esperanza
Q. El Aguacatillo	ED - Estudio Unidos por el Agua - Circuito Santo Domingo - El Compromiso
Q. Cañaveral o el Zancudo	EBA
Q. Cañaveral o el Zancudo	ED - Estudio unidos por el Agua - Circuito Santo Domingo - El Compromiso
Q. El Aguacate	EBA
Q. La Mansion	EBA
Q. La Bermejala	EBA
Q. La Chorrera o el Molino	EBA
Q. La Honda	EBA
Q. La Hondita	EBA
Q. El Ahorcado	EBA

Drenaje	Fuente estudio
Q. Santa Elena	EBA
Q. Chorro hondo	EBA
Q. La Rafita	EBA
Q. La Rafita	ED - Estudio El Pacífico - Contrato No. 4600088128 de 2020
Q. Gallinaza o Cañeria	ED - Convenio 4600076515 de 2018 Nororiental - San Antonio – Qda La Gallinaza
Q. Santa Elena	EBA
Q. San Antonio	ED - Convenio 4600076515 de 2018 Nororiental - San Antonio – Qda San Antonio
Q. La Castro	EBA
Q. Meditadora	ED - Convenio 4600076515 de 2018 Nororiental - La Sierra – Qda La Meditadora
Q. El Ñato	EBA
Q. La Borrachera 1	ED - Contrato_4600090710_2021_Macro Santa Elena - La Borrachera
Q. La Espadera o Bizarro	ED - Estudio La Palma
Cañada La Granja	ED - Estudio La Palma
Q. La Poblada	EBA
Q. La Presidenta	EBA
Q. La Escopeteria	EBA
Q. La Aguacatala	EBA
Q. La Paulita	EBA
Q. Zuñiga	EBA
Q. Piedras Blancas	EBA
Q. El Rosario	EBA
Q. Santa Elena	ED - Estudio La Palma
Q. La Volcana	EBA
Q. Doña Maria	EBA
Q. La Mauala	EBA
Q. La Limona	EBA
Q. La Manguala	EBA
Q. La Manguala	ED - Ecoparque La Riviera
Q. La Zorrita	EBA
Q. La Cañada	EBA
Q. La Despensa	EBA
Q. La Candela	EBA
Q. La Chorrera	EBA
Q. La Larga	EBA
Q. Minitas	EBA
Q. La Astillera	EBA
Q. La Guayabala	EBA
Q. Altavista	EBA
Q. La Picacha	EBA
Q. La Guayaba	EBA

Drenaje	Fuente estudio
Q. Ana Diaz	EBA
Q. Ana Diaz	ED - Contrato No. 3302-567 de 2019 Base Militar de Occidente -Corriente Ana Diaz
Q. La Romerala	ED - Contrato No. 3302-567 de 2019 Base Militar de Occidente - Corriente La Romerala
Q. La Hueso	EBA
Q. La Leonarda	EBA
Q. La Pelahueso	EBA
Q. La Iguaná	EBA
Q. La Gómez	EBA
Q. La Corcovada	EBA
Cañada Pajarito o Acequia Arriba	ED - Estudio Transversalidades La iguaná- Pajarito
Q. La Garcia	EBA
Q. LaCican	EBA
Q. El Hato o La Guayaba	EBA
Q. la Potrera	EBA
Q. Agua Fría	EBA
Q. Potreritos	EBA
Q. La Puerta	EBA
Q. La Alcalá	EBA
Q. Malpaso	EBA
Q. Moñonga	EBA
Q. Moñonga	ED - Contrato_4600087101_2020_Iguaná - Q. La Moñonga
Q. La Quintana	EBA
Q. La Batea	ED - Convenio 4600076515 de 2018 Noroccidental - Aures II
Q. La Cantera	EBA
Q. La Culebra	ED - Plan Parcial Carabineros
Q. La Madera	EBA
Q. La Sucia	EBA
Q. La Frisola	EBA
Q. La Volcana	EBA
Q. Miserenga	EBA

Fuente: DAP Distrito Especial de Medellín, 2026

9.5.2 Nivel 2. Modelaciones hidráulicas del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá

Este nivel aplica para aquellos tramos en los cuales el DAGRD y SIATA disponen de modelaciones hidráulicas con representación de profundidad y velocidad de flujo, se verificó el potencial técnico de la instrumentación instalada y la consistencia de la información generada, con el propósito de validar su incorporación como insumo directo para la zonificación. En la Tabla 64 se observan los drenajes que poseen modelaciones hidráulicas.

Tabla 64 Listado de drenajes analizados mediante modelación hidráulica DAGRD-SIATA

Drenaje	Subcuenca	Fuente modelo
Q. La Rosa - Moscu No. 1	Q. La Rosa	DAGRD
Q. La Picacha - Aguas Frias	Q. La Picacha	DAGRD
Q. La Sanin - Las Palmas	Q. La Presidenta	DAGRD
Q. Yerbabuena - Las Lomas No. 1	Q. La Presidenta	DAGRD
Q. La Presidenta - Vizcaya	Q. La Presidenta	DAGRD
Feria Ganado - Alcantarillado Lidar	Q. Toscana	DAGRD
R. Medellin - Estacion Metro Acevedo	R. Aburra-Medellin	DAGRD
Q. Santa Elena - Plaza Minorista	Q. Santa Elena	DAGRD
Q. La Tinaja - Barrio Girardot	Q. La Tinaja	DAGRD
Q. Malpaso - El Paraiso 1	Q. Malpaso	DAGRD
Q. La Toscana - Zenu	Q. La Toscana	DAGRD
Deprimido Feria de Ganado - Encharcamiento Vial	Q. Toscana	DAGRD
Gratamira - Alcantarillado Lidar	Q. Toscana	DAGRD
Q. La Rosa - Nivel Alcantarillado	Q. La Rosa	DAGRD
Vizcaya - Alcantarillado Lidar	Q. La Presidenta	DAGRD
Av. La Paralela - Encharcamiento Vial	Q. La Tinaja	DAGRD
Q. La Cantera - Estacion Metro Caribe Lidar	Q. La Cantera	DAGRD
Q. La Loca - Villa Esperanza	Q. Santa Elena	DAGRD
Q. La Cantera Norte - Picacho	Q. La Cantera	DAGRD
Q. La Aguadita - Colinas De Enciso	Q. Santa Elena	DAGRD
Q. La Castro - Union de Cristo	Q. Santa Elena	DAGRD
Q. Altavista - Manzanares	Q. Altavista	DAGRD
Q. Potrerita - Manzanillo	Q. Altavista	DAGRD
Q. La Buga - Buga	Q. Altavista	DAGRD
Q. Santa Elena - La Paz	Q. Santa Elena	DAGRD
Q. La Rosa - Choco Chiquito	Q. La Rosa	DAGRD
Q. Cantera Sur - Miramar	Q. La Cantera	DAGRD
Q. La Honda - Caracoli Balmoral	Q. La Iguana	DAGRD
Q. La Cantera	Q. La Cantera	SIATA
Q. La Tinaja	Q. La Tinaja	SIATA
Q. La Cantera Norte	Q. La Cantera	SIATA
Q. La Cantera Sur	Q. La Cantera	SIATA
Q. La Toscana	Q. La Toscana	SIATA
Q. La Rosa	Q. La Rosa	SIATA
Q. La Rosa	Q. La Rosa	SIATA
Q. Santa Elena	Q. Santa Elena	SIATA
Q. La Loca	Q. Santa Elena	SIATA
Q. La Aguadita	Q. Santa Elena	SIATA
Q. Santa Elena	Q. Santa Elena	SIATA
Q. La Castro	Q. Santa Elena	SIATA
Q. Yerbabuena	Q. La Presidenta	SIATA

Drenaje	Subcuenca	Fuente modelo
Q. La Presidenta	Q. La Presidenta	SIATA

Fuente: DAP Distrito Especial de Medellín, 2026

9.5.3 Nivel 3. Planes Integrales de Ordenamiento y Manejo de Microcuencas

En los tramos no cubiertos por los niveles de detalle previamente definidos, se empleó como referencia la información hidrológica e hidráulica contenida en los Planes Integrales de Ordenamiento y Manejo de Microcuencas (PIOM) vigentes para las microcuencas del Distrito, elaborados mediante convenios con el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Los drenajes que cuentan con información de PIOM se indican en la Tabla 65.

Tabla 65 Listado de drenajes con zonificación del PIOM

Drenaje	Fuente estudio
Q. La Rosal o Moscú	PIOM - P_La_Rosa_Bermejala
Q. Carevieja o Villa Guadalupe	PIOM - P_La_Rosa_Bermejala
Q. El Aguacatillo	PIOM - P_La_Rosa_Bermejala
Q. Cañaveral o El Zancudo	PIOM - P_La_Rosa_Bermejala
Q. La Bermejala	PIOM - P_La_Rosa_Bermejala
Q. La Bermejala 2	PIOM - P_La_Rosa_Bermejala
Q. La Raizala	PIOM - P_La_Rosa_Bermejala
Q. La Mansion - Q. La Raizala	PIOM - P_La_Rosa_Bermejala
Q. La Gallinaza o Cañería	PIOM - P_Sta_Elena
Q. La Pastora (La Pulgarina - La Pulgarina 1)	PIOM - P_La Pastora
Q. Los Arados	PIOM - P_La Cangreja
Q. Potrerito	PIOM - P_La Guayabala
Q. Caza Diana	PIOM - P_La Guayabala
Q. Malpaso	PIOM - P_Malpaso
Q. Moñonga	PIOM - P_Malpaso

Fuente: DAP Distrito Especial de Medellín, 2026

9.5.4 Nivel 4. Método geomorfológico complementado con caudales del Estudio Básico de Amenazas

En los tramos para los cuales no se dispuso de información proveniente de los niveles anteriores se aplicó un análisis geomorfológico fluvial, complementado con los caudales hidrológicos obtenidos en los estudios básicos de la cuenca, los PIOM o teniendo en cuenta las coberturas hidráulicas. Los drenajes que cuentan este análisis se presentan en la Tabla 66.

Tabla 66 Listado de drenajes con análisis geomorfológico fluvial

Drenaje	Longitud tramo (m)
Q. Blanquizala	728.70
Caño Popular	442.42
Q. Seca 1	2.723,46
Q. El Mister	639,11
Q. La Loca	7.346,04
Q. La Arenera	1.489,29
Q. La Llorona	1.543,85
Q. La Loma	2.079,40
Q. La Escopetería 2	874,94
Q. El Indio	2.527,36
Caño La Mota	604,89
Q. La Guaguita	2.946,73
Q. La Quebradita	1.155,48
Q. Granizal o La Herrera	2.903,84
Q. La Cantera	4.265,85
Q. Tinajas	2.375,93
Q. La Feria	2.296,77
Q. La Cantera Ramal Sur	3.015,46
Q. La Buga	508,23
Q. La Rosa o Moscú o La Sapera	1.095,48
Q. La Picacha o Aguas Frias	469,27
Q. La Aguadita	617,77
Q. Las Mercedes	153,13
Q. Potrerito o Caratala	408,72
Q. La Honda	441,18
Q. El Chocho	1.257,79
Q. Minitas	5.142,62
Q. Las Perras	1.029,43
Q. Los Lagos	187,29
Q. Altavista	3.433,85
Q. Sanin o Moná	5.186,02
Q.Yerbabuena	2.070,52
Q. Malpaso	2.419,60
Q. La Limona 1	1.975,51
Q. La Tribuna	3.919,26
Q. La Cabuyala	8.241,66
Q. Barba Azul	2.978,74
Q. La Roma	1.697,79
Q. La Sapera	1.397,90

Drenaje	Longitud tramo (m)
Caño La Carmelita	1.030,57
Caño A o Q. La Ronda	2.493,06
Q. La Chorrera	1.882,47
Q. Doña María (Drenaje secundario)	929,89
Q. La Guapante	3.229,43
Q. La Aguada	3.792,30

Fuente: DAP Distrito Especial de Medellín, 2026

9.5.5 Nivel 5. Zonificación POT 2014 y Tramos de cauce en cobertura hidráulica

En los tramos de quebrada que no aplicaban los anteriores análisis, se complementó la zonificación con aquella que fue la incorporada en la cartografía del POT 2014, cuyo principio fue el criterio geomorfológico según se señala en el Documento Técnico de Soporte de este instrumento de planificación. Los tramos a los que les aplica esta zonificación se encuentran en la Tabla 67.

Tabla 67 Drenajes que mantuvieron la zonificación del POT 2014

Drenaje|	Fuente estudio
Q. La Feria	POT 2014
Q. Blanquizala	POT 2014
Q. El Platanal	POT 2014
Q. Granizal o la Herrera	POT 2014
Q. Minitas	POT 2014
Q. La Cantera	POT 2014
Q. La Loma	POT 2014
Q. La Escopetería 2	POT 2014

Fuente: DAP Distrito Especial de Medellín, 2026

9.6 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIONES DEL SUELO RURAL

En la Tabla 68 se presentan las cuencas y las áreas de las categorías alta, media y baja de amenaza inundaciones del suelo rural de las cuencas priorizadas para cada uno de los corregimientos del Distrito de Medellín (Ilustración 218). El detalle de cada uno de los drenajes zonificados en suelo rural se presenta en la carpeta 04_Imagenes en Imágenes Detalle.

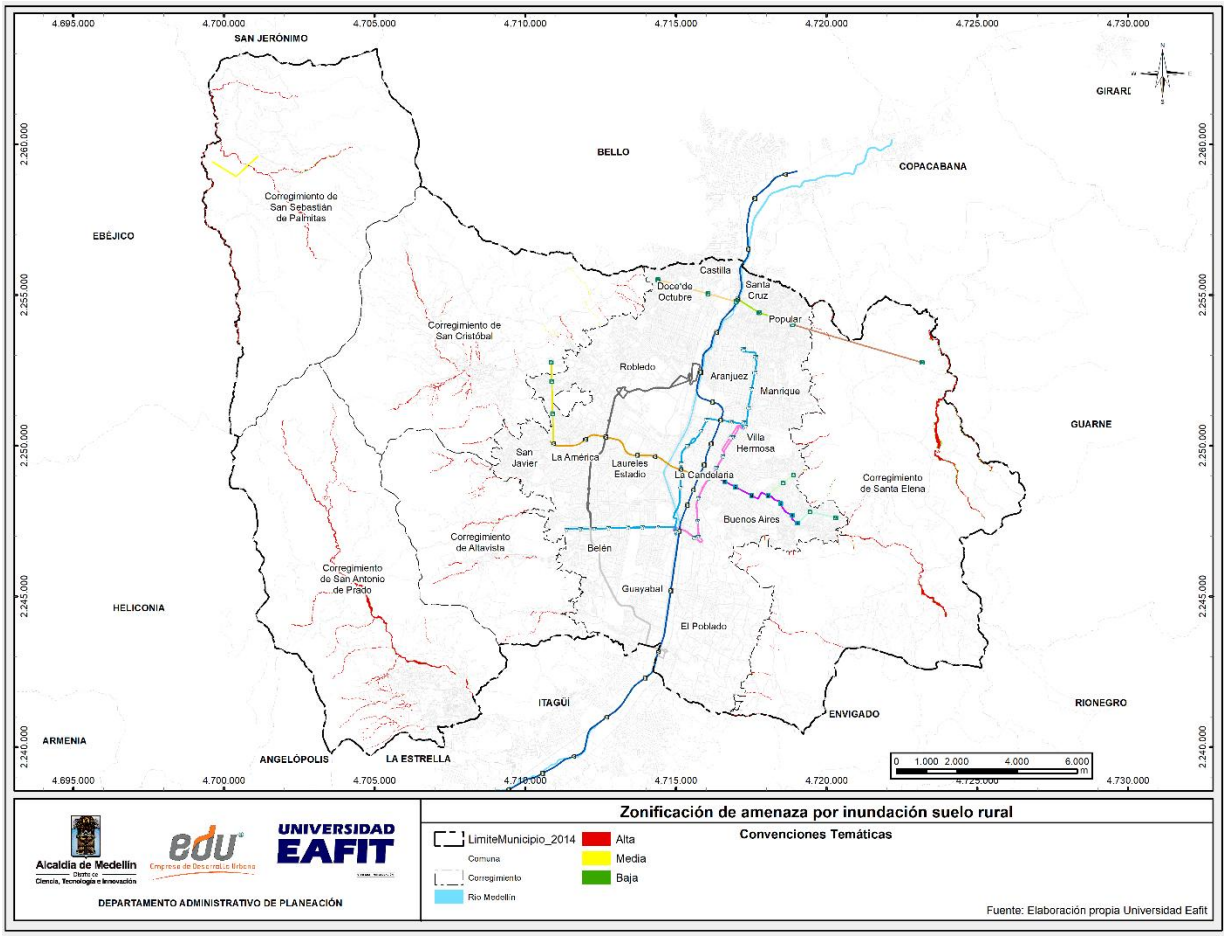


Ilustración 218. Zonificación de la amenaza por inundación del suelo rural del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Tabla 68. Áreas de amenaza por inundaciones del suelo rural de los corregimientos del Distrito de Medellín

Corregimiento	Cuencas	Amenaza alta (ha)	Amenaza media (ha)	Amenaza baja (ha)
San Sebastián de Palmitas (50)	Q. La Frisola Q. La Lejía Q. La Sucia Q. Miserenga	38,1	0,7	0,9
San Cristóbal (60)	Q. Agua Frías Q. La Arenera Q. La García Q. La Hueso Q. La Iguana Q. La Leonarda Q. La Madera Q. La Moñonga Q. La Potrera Q. La Puerta Q. Potreritos	23,0	3,0	0,2

Corregimiento	Cuencas	Amenaza alta (ha)	Amenaza media (ha)	Amenaza baja (ha)
Altavista (70)	Q. Altavista Q. Ana Diaz Q. La Guayaba Q. La Guayabala Q. La Picacha	13,2	0,6	2,0
San Antonio de Prado (80)	Q. Doña María Q. La Astillera Q. La Candela Q. La Chorrera San Antonio Prado Q. La Despensa Q. La Larga Q. La Limona Q. La Manguala Q. La Mauala Q. La Zorrita Q. Minitas	76,5	0,5	1,5
Santa Elena (90)	Q. El Ahorcado Q. El Ñato Q. El Rosario Q. La Aguacatala Q. La Castro Q. La Escopetería Q. La Honda Q. La Hondita Q. La Paulita Q. La Presidenta Q. La Rafita Q. la Rafita - Chorro Hondo Q. La Seca Q. La Volcana Q. Piedra Gorda Q. Piedras Blancas Q. Santa Elena Q. Zuñiga	60,6	4,6	6,9
	Total general (ha)	211,38	9,42	11,45

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Los corregimientos de San Antonio de Prado y Santa Elena son los que presentan cuencas con mayor área en las categorías de amenaza alta por inundaciones, con 76,5 ha y 60,6 ha, seguidas de San Sebastián de Palmitas con 38,1 ha, San Cristóbal con 23,0 ha y Altavista con 13,2 ha (*Ilustración 219*). La amenaza media y baja tienen una mayor representación en el Corregimiento de Santa Elena, con

4,6 ha y 6,9 ha respectivamente; en los demás corregimientos no son muy representativas estas categorías de amenaza.

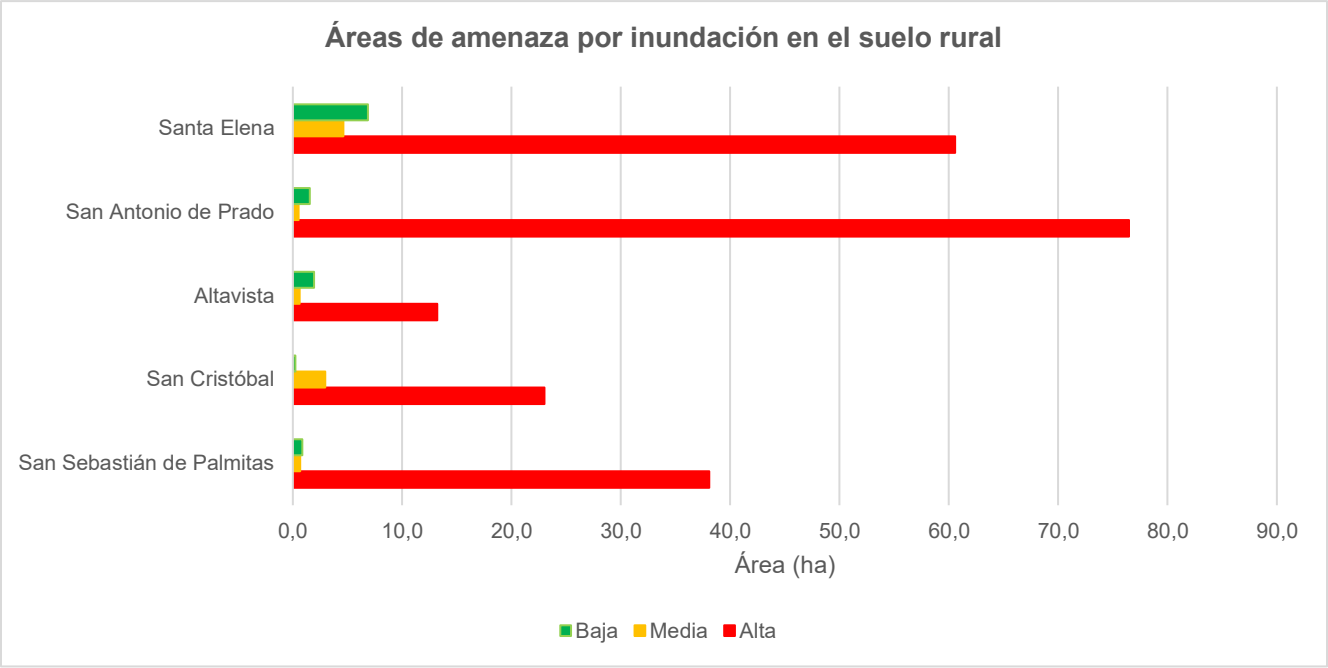


Ilustración 219. Distribución de la amenaza por inundación en el suelo rural del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

9.7 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIONES DEL SUELO SUBURBANO

En la Tabla 69 se presentan la descripción de la ubicación de las categorías alta, media y baja de amenaza por inundaciones para los polígonos definidos en el POT como suelo suburbano del Distrito de Medellín que tienen afectación por las cuencas priorizadas, esta distribución incluye las categorías de desarrollo restringido relacionadas con áreas destinadas a la parcelación de vivienda campestre, áreas para la localización de equipamientos y suelos suburbanos propiamente dichos (Ilustración 220).

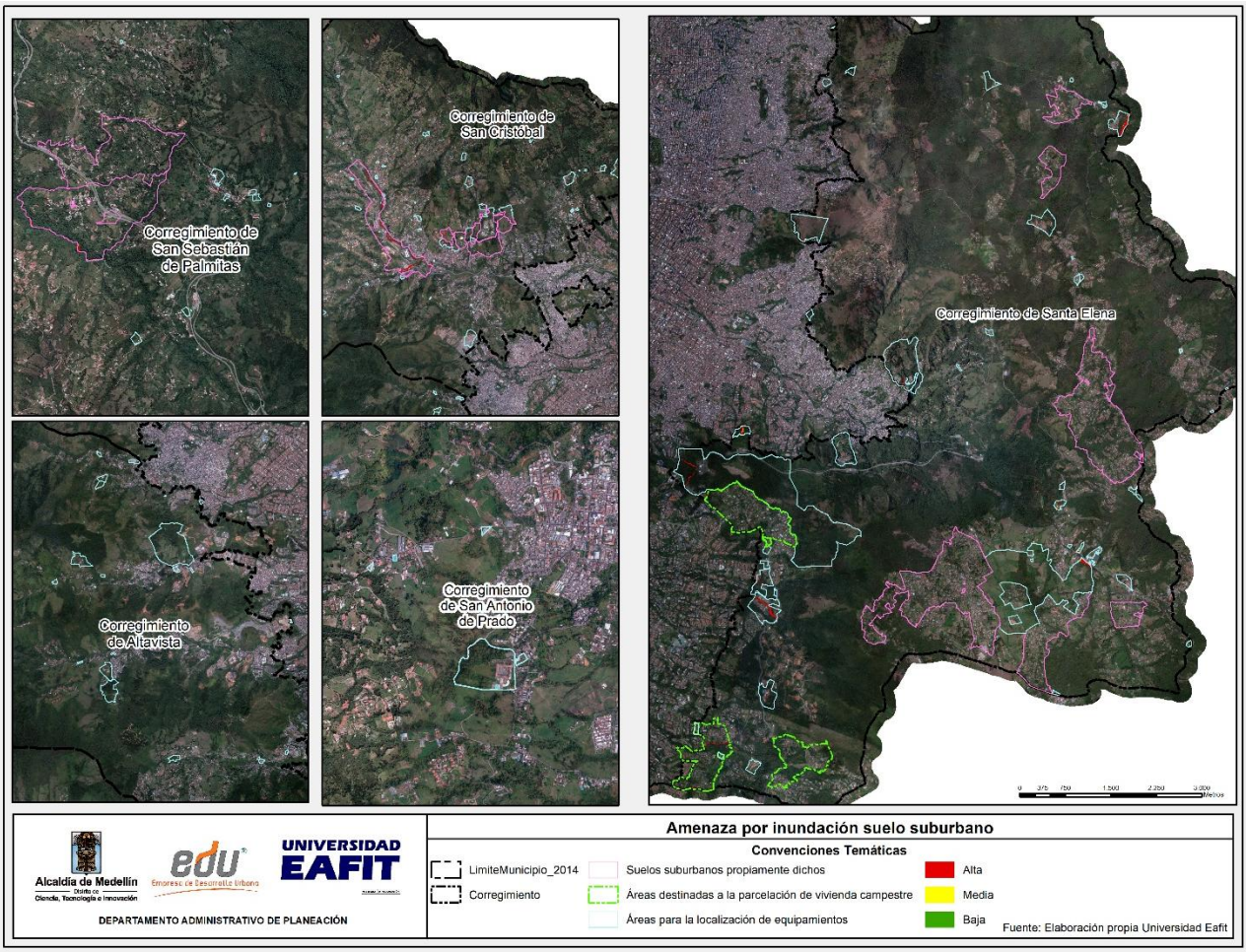


Ilustración 220. Amenaza por inundación del suelo suburbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 69. Áreas de amenaza por inundación del suelo suburbano del Distrito de Medellín

Área Suburbana	Cuenca	Amenaza alta Área (ha)	Amenaza media Área (ha)	Amenaza baja Área (ha)
Conexión Aburrá Cauca	Q. La Iguana Q. La Potrera Q. Potreritos	5,789	0,115	0,033
Santa Elena, Sector Central	Q. Santa Elena	0,178	0,000	0,000
El Tesoro	Q. La Aguacatala Q. La Paulita Q. Zúñiga	1,183	0,004	0,013
San José de Manzanillo	Q. La Guayabala	0,030	0,000	0,000
Pajarito	Q. La García Q. La Puerta - Borbollona	0,018	0,000	0,000
Pedregal Alto	Q. El Hato - La Guayaba	0,844	0,000	0,000
Corazón - El Morro	Q. Ana Diaz	0,078	0,008	0,017

Área Suburbana	Cuenca	Amenaza alta Área (ha)	Amenaza media Área (ha)	Amenaza baja Área (ha)
Aldea	Q. La Sucia	0,441	0,000	0,009
La Loma	Q. La Leonarda	0,009	0,000	0,000
Mirador del Poblado	Q. Yerbabuena	0,309	0,000	0,000
El Plan	Q. Sanín o Moná	0,118	0,000	0,000

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

El suelo suburbano con áreas destinadas a la parcelación de vivienda campestre, áreas para la localización de equipamientos y suelos suburbanos propiamente dichos que tiene mayor área de amenaza alta por inundación está asociada a las quebradas que discurren por la zona de la Conexión Aburrá-Cauca con una ocupación del 5,79 ha, seguida por el suelo suburbano de El Tesoro con 1,18 ha, el resto de los suelos suburbanos no superan 1 ha por polígono en esta categoría de amenaza (Ilustración 221).

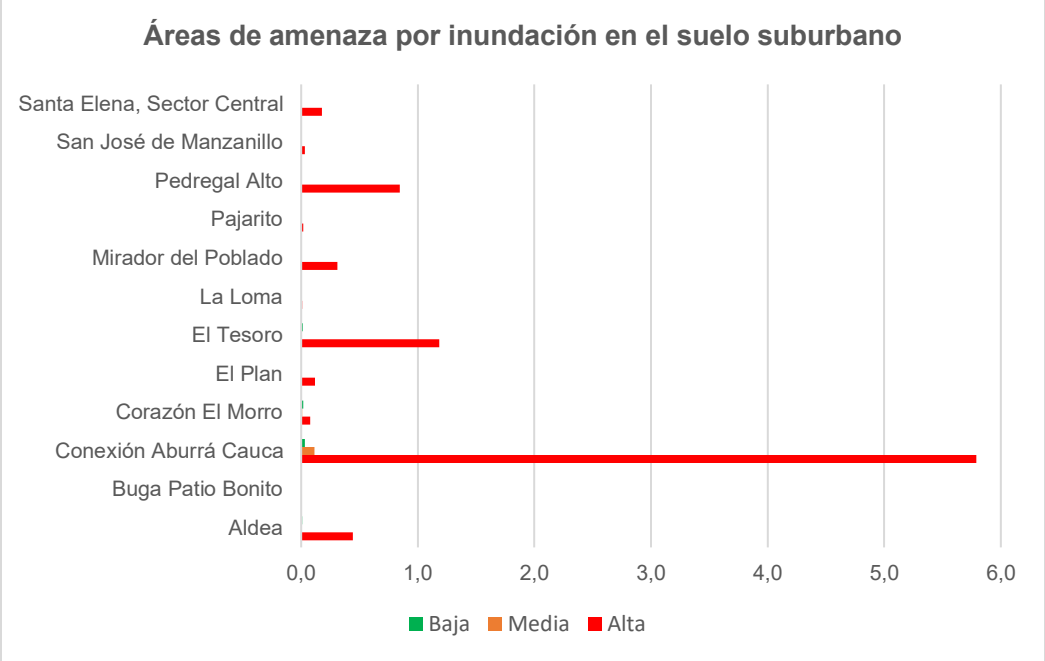


Ilustración 221. Distribución de la amenaza por inundación del suelo suburbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Otra de las categorías de desarrollo restringido del suelo suburbano corresponde con los centros poblados, en estos predomina la categoría de amenaza alta por inundación al interior de los polígonos. Los centros poblados de Santa Elena – sector central y Aguas Frías – San Pablo presentan las mayores áreas en esta categoría, con 3,79 ha y 3,27 ha, seguidas de San José del Manzanillo con 2,52 ha, La Palma con 2,24 ha y Corazón el Morro con 2,06 ha como se muestra en la Ilustración 222, Ilustración 223 y Tabla 70.

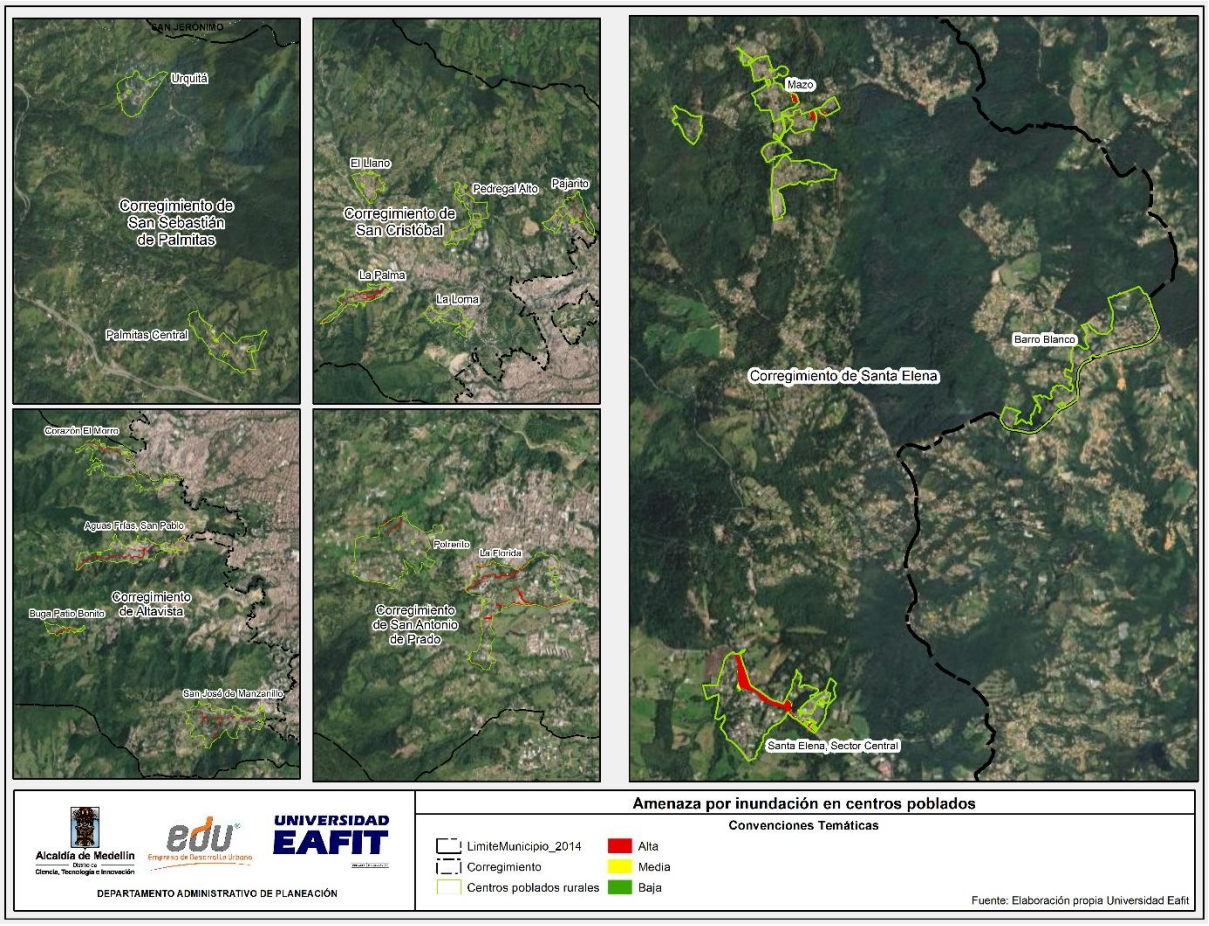


Ilustración 222. Amenaza por inundación en centros poblados del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 70. Áreas de amenaza por inundación en centros poblados del Distrito de Medellín

Corregimiento	Centro Poblado	Amenaza alta Área (ha)	Amenaza media Área (ha)	Amenaza baja Área (ha)
Altavista	Corazón El Morro	2,06	0,01	0,06
	Aguas Frías, San Pablo	3,27	0,05	0,07
	San José del Manzanillo	2,52	0,02	0,01
	Buga Patio Bonito	0,82	0,00	0,00
San Sebastián de Palmitas	Palmitas central	0,00	0,00	0,00
	Urquitá	0,00	0,00	0,00
San Antonio de Prado	Potrerito	0,00	0,00	0,00
	La Florida	0,85	0,02	0,01
San Cristóbal	La Palma	2,24	0,00	0,10
	El Llano	0,52	0,03	0,01
	Pedregal Alto	0,00	0,00	0,00

Corregimiento	Centro Poblado	Amenaza alta Área (ha)	Amenaza media Área (ha)	Amenaza baja Área (ha)
	Pajarito	1,26	0,26	0,06
	La Loma	0,35	0,00	0,00
Santa Elena	Santa Elena, sector central	3,79	0,21	0,31
	Barro Blanco	0,00	0,00	0,00
	Mazo, Los Vasquez	0,00	0,00	0,00
	Mazo	0,72	0,05	0,11

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

Cabe destacar que en los centros poblados del corregimiento de San Sebastián de Palmitas no se presenta amenaza por inundación. En contraste todos los centros poblados del corregimiento de Altavista presentan algún grado de amenaza.

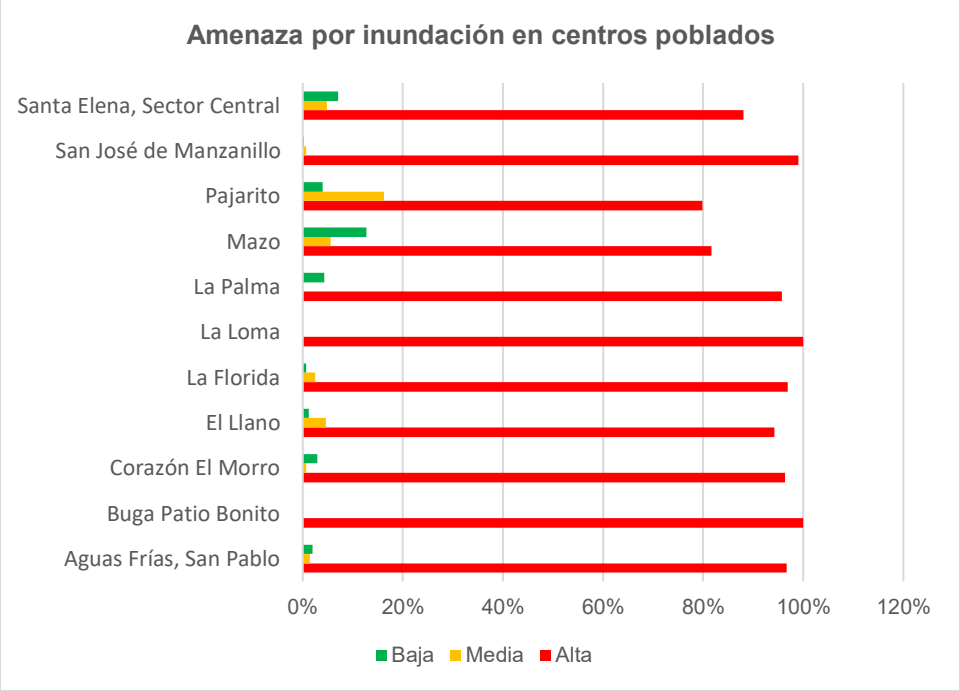


Ilustración 223. Distribución de la amenaza por inundación en los centros poblados del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

9.8 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIONES DEL SUELO URBANO

En la Tabla 71 se presentan las cuencas y el área de las categorías alta, media y baja de amenaza por inundación para cada uno de los polígonos definidos en el POT como suelo urbano del Distrito de Medellín (Ilustración 224 e Ilustración 225).

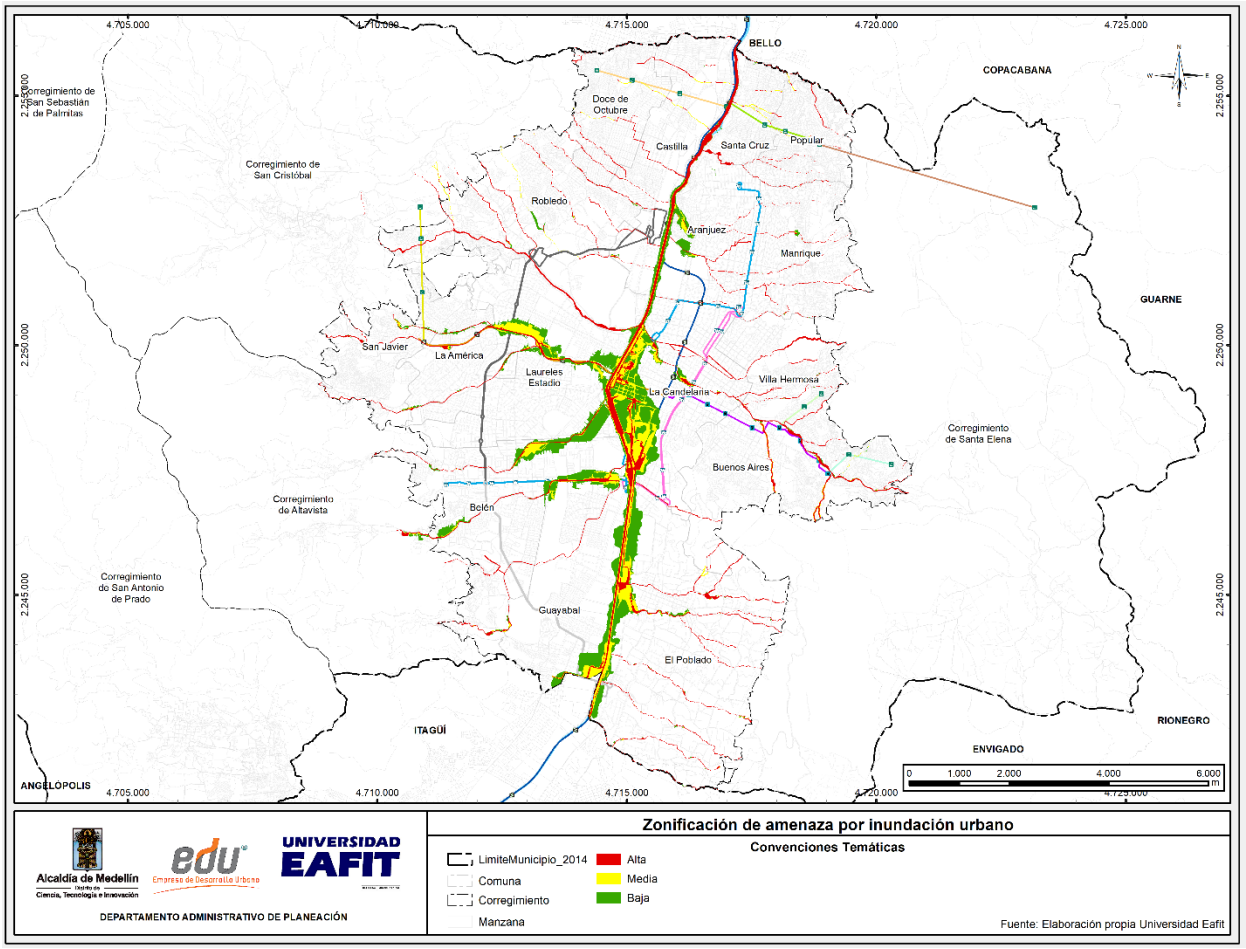


Ilustración 224. Amenaza por inundación del suelo urbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

En el suelo urbano predomina la categoría de amenaza baja con un 40%, seguido de la categoría de amenaza alta con 38,14% y la categoría de amenaza media corresponde al 21,29%. Las cabeceras de los corregimientos de San Cristóbal, Altavista y San Antonio de Prado están clasificadas como suelo urbano, en estas se presenta amenaza por inundación. En la categoría de amenaza alta, San Antonio de Prado presenta 26,22 ha, seguido de San Cristóbal con 13,50 ha y Altavista con 2,71 ha (Ilustración 225 y Tabla 71).

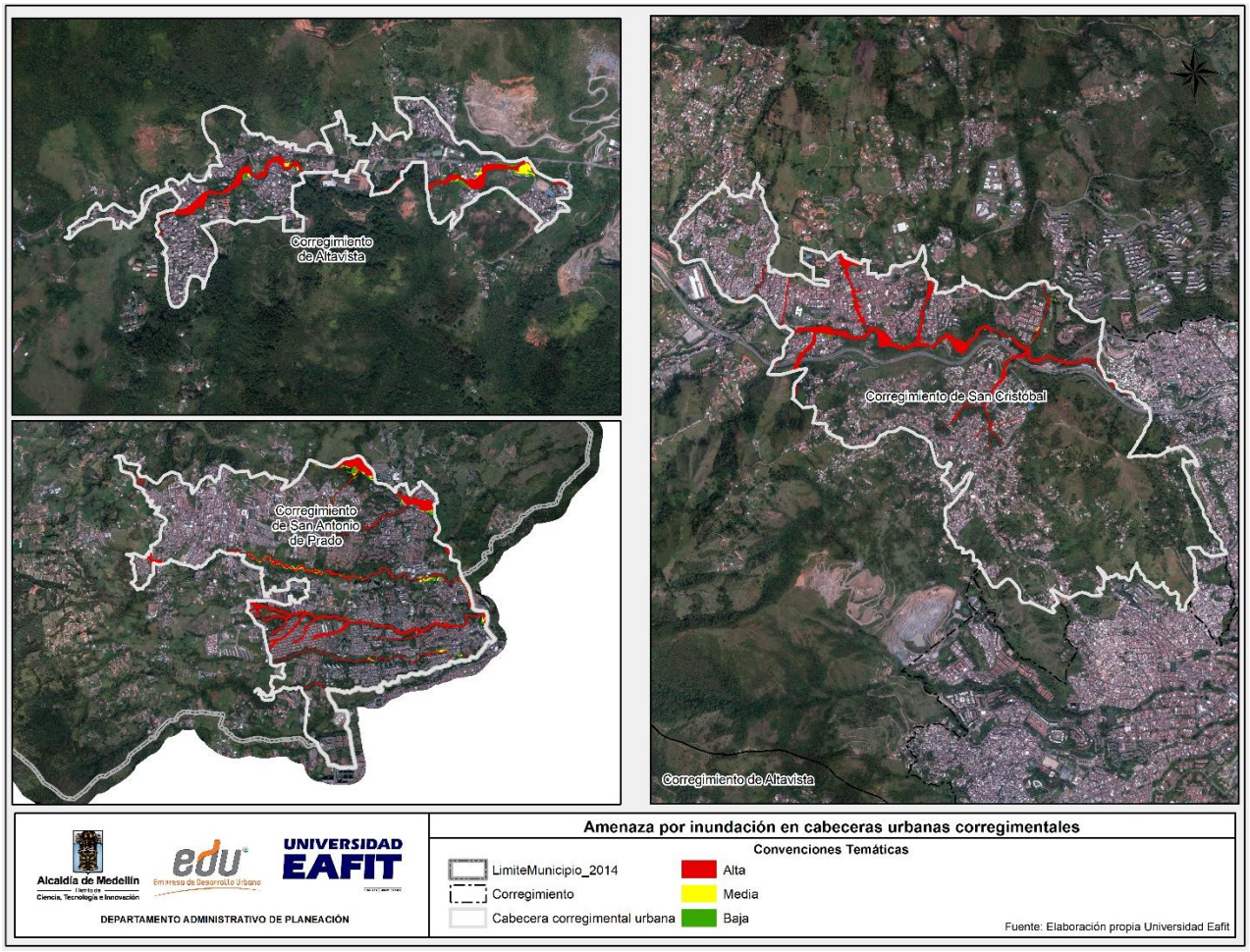


Ilustración 225. Amenaza por inundación del suelo urbano corregimental del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 71. Áreas de amenaza por inundación del suelo urbano del Distrito de Medellín

Área Urbana - Comuna	Localización de la amenaza	Amenaza alta Área (ha)	Amenaza media Área (ha)	Amenaza baja Área (ha)
Comuna 1- Popular	Q. Cañaveral - El Zancudo Q. La Seca	4,66	0,49	0,01
Comuna 2- Santa Cruz	Q. La Seca	10,07	2,43	0,51
Comuna 3 - Manrique	Q. Canaveral - El Zancudo Q. El Ahorcado Q. La Bermejala Q. La Chorrera - El Molino Q. La Honda Q. La Hondita	7,66	0,17	0,89
Comuna 4 - Aranjuez	Q. Canaveral - El Zancudo Q. El Ahorcado	17,12	4,75	20,63

Área Urbana - Comuna	Localización de la amenaza	Amenaza alta Área (ha)	Amenaza media Área (ha)	Amenaza baja Área (ha)
	Q. La Bermejala Q. La Chorrera - El Molino Q. La Honda			
Comuna 5 - Castilla	Q. La Cantera Ramal Sur Q. La Madera Q. La Quintana Q. Malpaso	23,77	3,40	9,12
Comuna 6 – 12 de Octubre	Q. La Madera Q. La Quintana	7,12	1,35	0,02
Comuna 7 - Robledo	Q. La García Q. La Gómez Q. La Iguana Q. La Moñonga Q. La Puerta - Borbollona Q. La Quintana Q. Malpaso	25,40	2,67	3,52
Comuna 8 – Villa Hermosa	Q. El Ahorcado Q. El Ñato Q. La Castro Q. La Rafita Q. la Rafita - Chorro Hondo Q. Santa Elena	16,83	0,73	1,14
Comuna 9 – Buenos Aires	Q. Santa Elena	14,79	3,10	0,43
Comuna 10 – La Candelaria	Q. El Ahorcado	45,89	68,42	83,70
Comuna 11 - Laureles	Q. Ana Diaz Q. La Hueso Q. La Iguana Q. La Picacha	18,44	21,70	62,98
Comuna 12 – La América	Q. Ana Diaz Q. La Hueso Q. La Pelahueso Q. La Picacha	7,31	4,29	7,11
Comuna 13 – San Javier	Q. Ana Diaz Q. La Hueso Q. La Iguana Q. La Leonarda Q. La Pelahueso	9,52	0,78	2,80
Comuna 14 – El Poblado	Q. La Aguacatala Q. La Escopetería Q. La Paulita Q. La Poblada Q. La Presidenta Q. La Volcana	40,97	36,28	57,65

Área Urbana - Comuna	Localización de la amenaza	Amenaza alta Área (ha)	Amenaza media Área (ha)	Amenaza baja Área (ha)
	Q. Zuñiga			
Comuna 15 - Guayabal	Q. Altavista Q. La Guayabala	16,89	19,63	55,09
Comuna 16 - Belén	Q. Altavista Q. La Guayabala Q. La Picacha	21,42	12,02	43,54
Cabecera San Cristóbal (60)	Q. Aguas Frías Q. El Hato - La Guayaba Q. La Iguana Q. La Leonarda Q. La Potrera	13,50	0,87	0,09
Cabecera Altavista (70)	Q. Altavista	2,71	0,26	0,23
Cabecera San Antonio de Prado (80)	Q. Doña María Q. La Cañada Q. La Limona Q. La Manguala Q. La Mauala	26,22	1,07	1,89

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

La comuna 10 es la comuna que mayor área presentan en las categorías de amenaza alta y media con 114,3 ha, seguida de las comunas 14, 11, 15 y 16 con áreas que oscilan entre los 77,2 ha, 40,1 ha, 36,5 ha y 33,4 ha (*Ilustración 226*). Las comunas 7, 5 y 4 presentan áreas entre 28 ha y 21,9 ha respectivamente en estas dos categorías; las comunas restantes tienen áreas menores de 12,5 ha en amenaza media y alta.

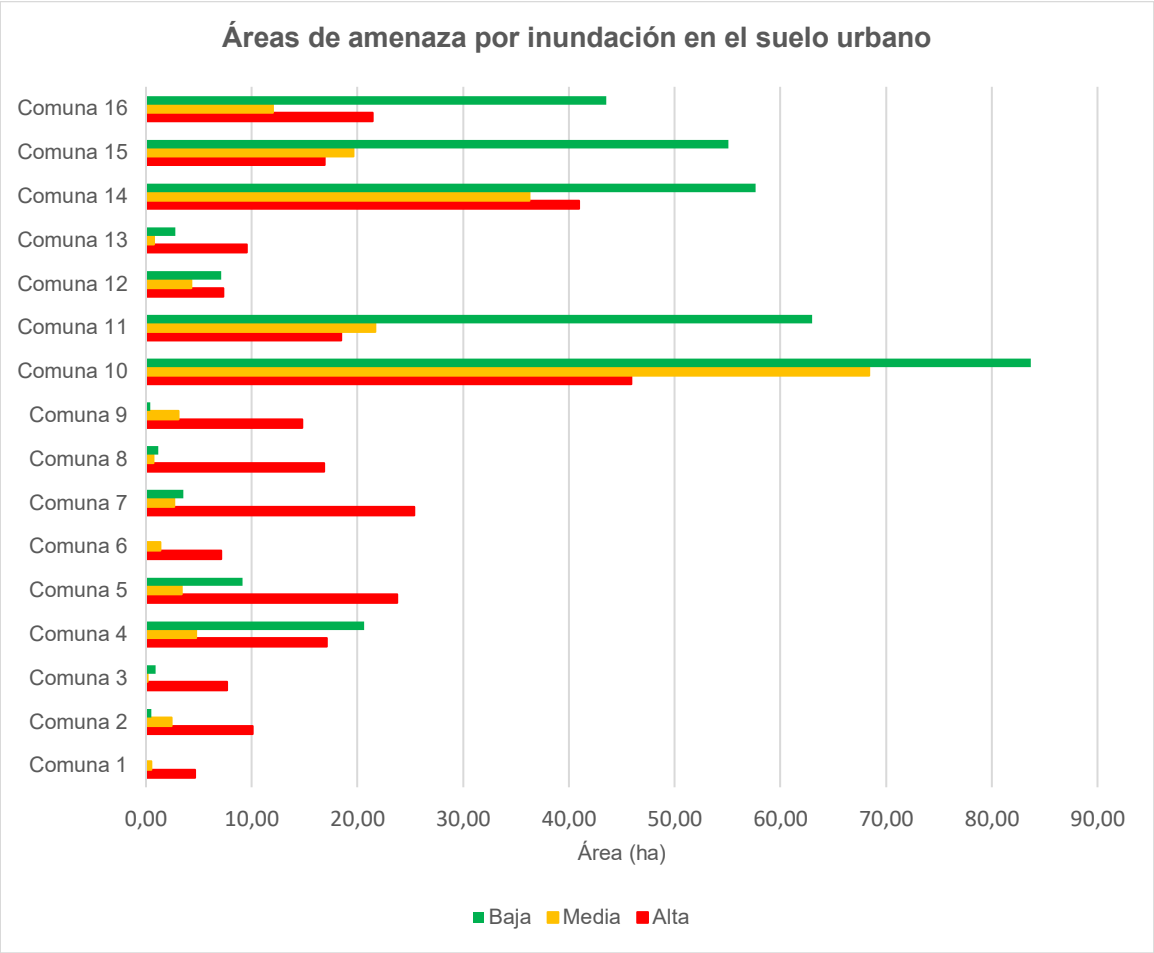


Ilustración 226. Amenaza por inundaciones del suelo urbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

9.9 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN DEL SUELO DE EXPANSIÓN

En la Tabla 72 se presentan las áreas de las categorías alta, media y baja de amenaza por inundaciones para cada uno de los polígonos definidos en el POT como suelo de expansión del Distrito de Medellín donde se tiene influencia por las cuencas priorizadas (Ilustración 227).

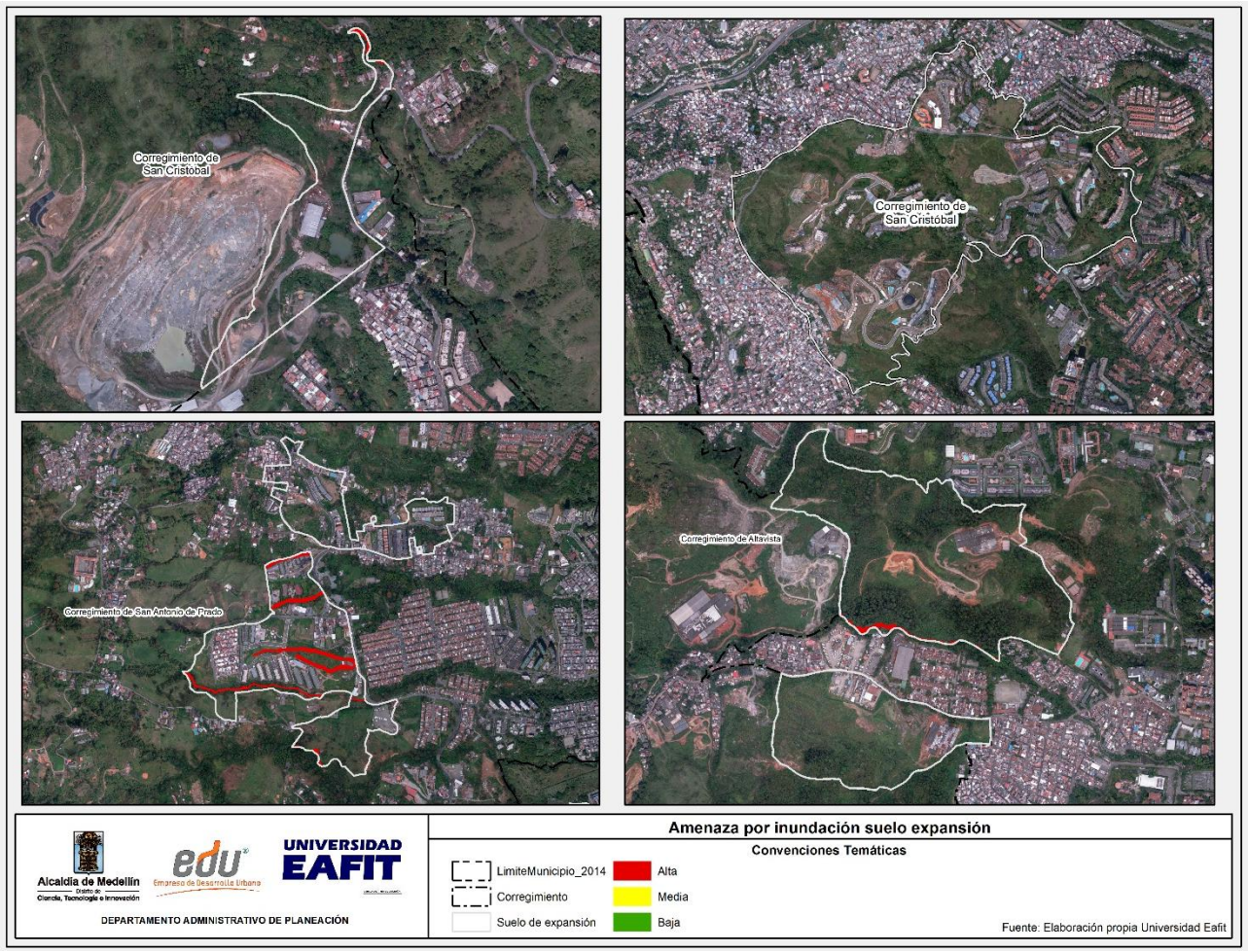


Ilustración 227. Amenaza por inundaciones del suelo de expansión del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

La amenaza alta por inundación sólo se encuentra en los polígonos de Eduardo Santos, El Noral y La Florida, ocupando 0,04 ha, 0,34 ha y 1,85 ha respectivamente de las áreas con amenaza alta (Ilustración 228).

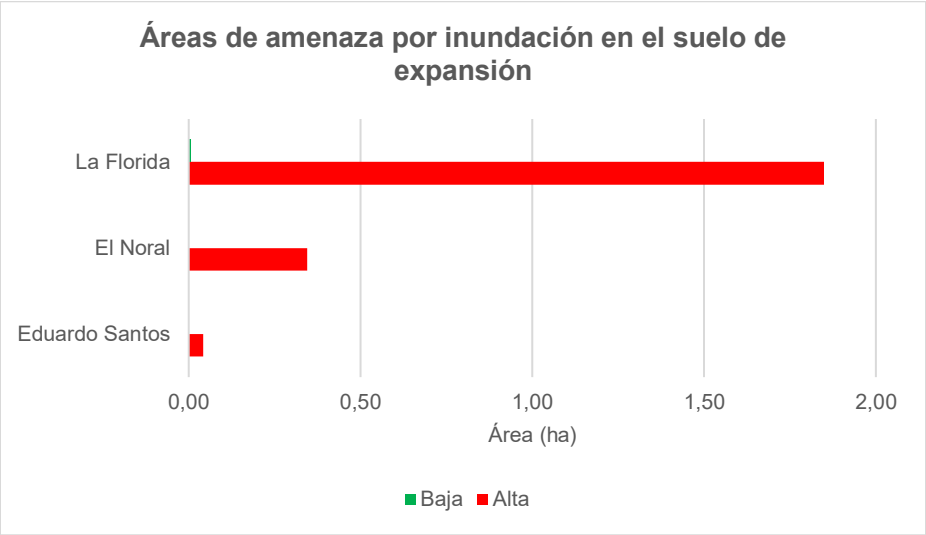


Ilustración 228. Amenaza por inundaciones del suelo de expansión del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 72. Amenaza por inundación del suelo de expansión del Distrito de Medellín

Área Expansión	Cuenca	Amenaza alta Área (ha)	Amenaza media Área (ha)	Amenaza baja Área (ha)
El Noral	Q. La Picacha	0,34	0,00	0,00
La Florida	Q. La Limona Q. La Manguala Q. La Mauala	0,54	0,00	0,01
Eduardo Santos	Q. La Leonarda	1,85	0,00	0,00

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

9.10 AMENAZA POR TORRENCIALIDAD

La amenaza por avenidas torrenciales se relaciona con la probabilidad de recurrencia de aquellos fenómenos que involucran flujos hiperconcentrados encausados a lo largo de las quebradas, con proporciones variables entre agua, escombros, restos vegetales, lodo, entre otros, entre un 30% y un 70%.

Son áreas afectadas por corrientes de agua, lodo, fragmentos de roca y escombros en diferentes proporciones y tamaños (Bloom, 1991 en Hincapié et al, 2018) los cuales se encausan a lo largo de quebradas y los ríos de montaña, agrupando gran cantidad de flujos, como los flujos de lodos y/o escombros, lahares, flujos hiperconcentrados y superconcentrados, entre otros (Costa, 1988; Medina, 1991; Coussot & Meunier, 1996; Lavigne & Suba, 2004; Díaz-Onofre, 2008 en Hincapié et al, 2018) caracterizados por su corta duración, además de sus largos periodos de recurrencia y una distribución espacial y temporal errática (Durán et al., 1985; Parra, 1998; Parra et al., 1995; Piedrahíta,

1996; Castro, 2007). Estos eventos presentan velocidades altas por lo tanto un alto potencial destructivo.

Para la definición de la amenaza por avenidas torrenciales, se toma la metodología propuesta por el SGC en la Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales del año 2019, en donde se plantea la valoración del mismo a partir de la combinación de dos criterios, el primero de ellos correspondiente al valor de IDF y el segundo el valor de probabilidad o TR, todos ellos obtenidos de las curvas de amenaza, tal y como se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 73. Tabla de decisión para la definición de la amenaza por avenida torrencial

IDF	**Nivel de amenaza**		
IDF ≥ 50	Alta	Alta	Alta
1 < IDF < 50	Alta	Media	Media
IDF ≤ 1	Alta	Media	Baja
TR	25 años	100 años	500 años

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Teniendo en cuenta lo anterior, para la zona de estudio se identifican zonas de amenaza alta, media y baja por avenidas torrenciales, tal y como se describe a continuación.

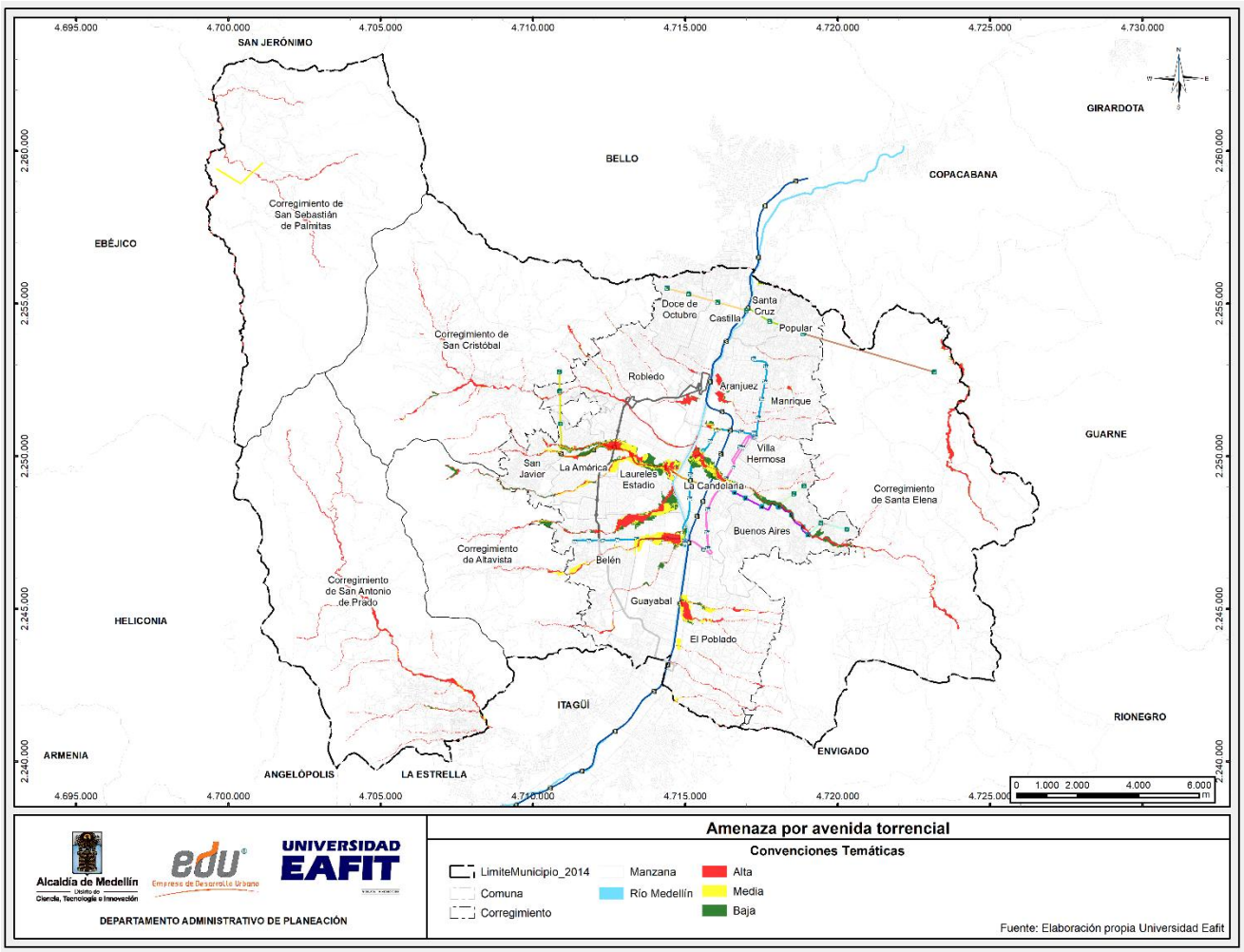


Ilustración 229. Amenaza por avenida torrencial en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Amenaza alta por avenidas torrenciales: Las zonas definidas como de amenaza alta, corresponde a áreas con alta probabilidad de presentar eventos de avenidas torrenciales con potencial de causar daños con un periodo de retorno entre 25 y 500 años. En términos del índice de intensidad de flujo IDF se entiende que, el mayor valor esperado se asocia a una intensidad de evento mayor y correlacionable con el nivel de daño, para este caso el valor esperado es de 50 m^3/s^2, para eventos asociados a periodos de retorno a 25 años. Ocupa el 60,92 % del área cubierta por la mancha de torrencialidad determinada por los análisis hidrológicos e hidráulicos, correspondiente a 586,72 ha.

Amenaza media por avenidas torrenciales: La categoría de amenaza media está asociada con zonas que en términos del índice de intensidad de flujo IDF presentan valores en los cuales se entiende que, el mayor valor esperado se asocia a una intensidad de evento mayor y correlacionable con el nivel de

daño, para este caso el valor esperado es de $1m^3/s^2$ a $50m^3/s^2$, con un periodo de retorno entre 25 y 500 años. Ocupa el 21,49 % del área cubierta por la mancha de torrencialidad determinada por los análisis hidrológicos e hidráulicos, correspondiente a 207 ha.

Amenaza baja por avenidas torrenciales: Comprenden zonas que eventualmente pueden presentar avenidas torrenciales, con una recurrencia de 500 años. El valor del índice de intensidad de flujo esperado para este evento es generalmente inferior a $1m^3/s^2$. Estas zonas de amenaza baja se encuentran como zonas discontinuas, e irregulares que bordean las zonas anteriormente referenciadas como de amenaza alta y media, sin presentar una distribución preferencial. Ocupa el 17,59 % del área cubierta por la mancha de torrencialidad determinada por los análisis hidrológicos e hidráulicos, correspondiente a 169,42 ha.

9.11 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES DEL SUELO RURAL

En la Tabla 74 se presentan las áreas por cuencas en las categorías alta, media y baja de amenaza avenidas torrenciales para cada uno de los corregimientos del Distrito de Medellín (Ilustración 231).

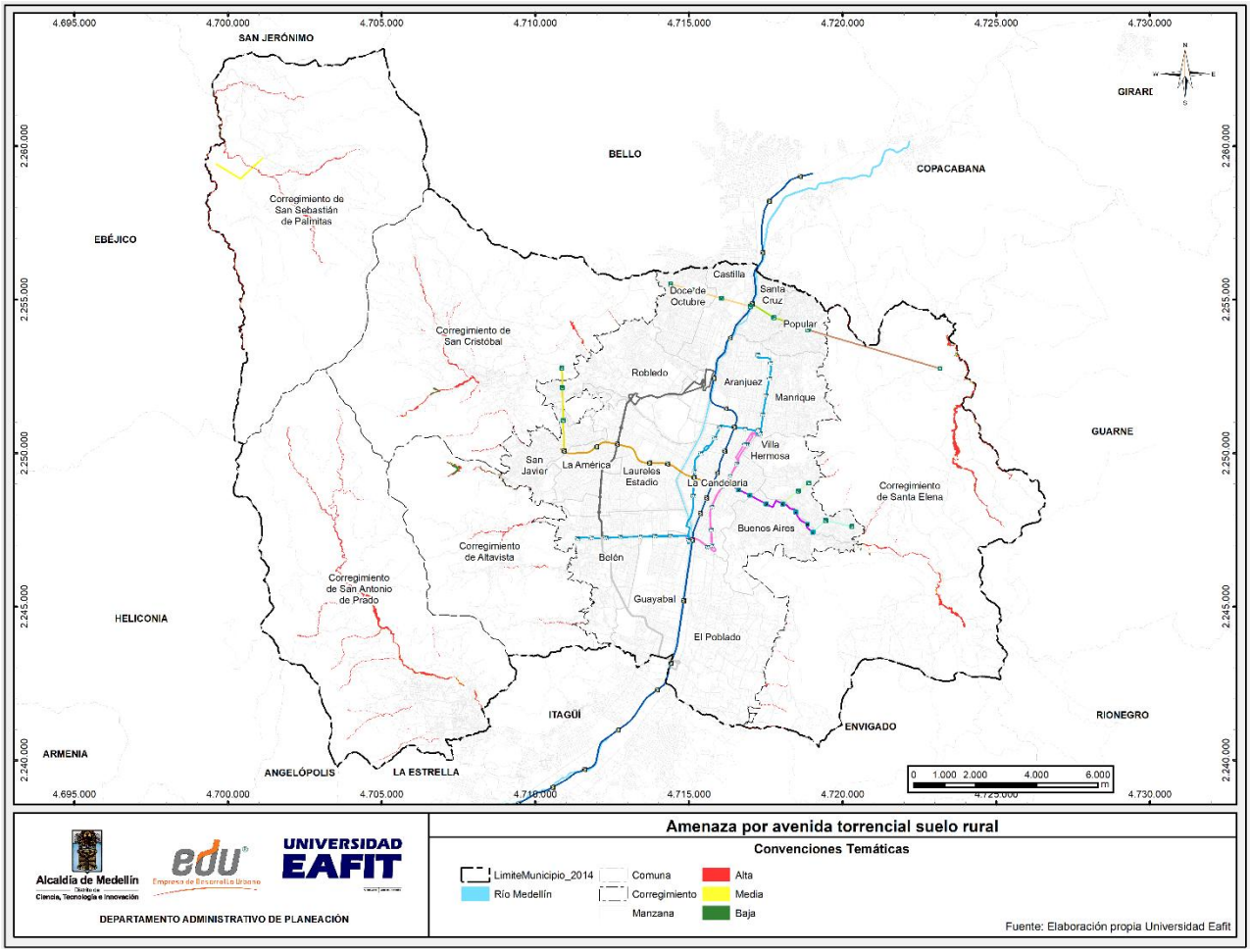


Ilustración 230. Amenaza por avenidas torrenciales del suelo rural del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Tabla 74. Áreas de amenaza por avenidas torrenciales de los corregimientos del Distrito de Medellín

Corregimiento	Cuencas	Amenaza alta Área (ha)	Amenaza media Área (ha)	Amenaza baja Área (ha)
San Sebastián de Palmitas (50)	Q. La Frisola Q. La Lejía Q. La Sucia Q. Miserenga	42,76	1,35	0,09
San Cristóbal (60)	Q. Agua Frías Q. La Arenera Q. La García Q. La Hueso Q. La Iguana Q. La Leonarda Q. La Madera Q. La Moñonga	18,63	0,36	0,47

Corregimiento	Cuencas	Amenaza alta Área (ha)	Amenaza media Área (ha)	Amenaza baja Área (ha)
	Q. La Potrera Q. La Puerta Q. Potreritos			
Altavista (70)	Q. Altavista Q. Ana Diaz Q. La Guayaba Q. La Guayabala Q. La Picacha	9,53	3,63	3,86
San Antonio de Prado (80)	Q. Doña María Q. La Astillera Q. La Candela Q. La Chorrera San Antonio Prado Q. La Despensa Q. La Larga Q. La Limona Q. La Manguala Q. La Mauala Q. La Zorrita Q. Minitas	73,66	3,50	0,68
Santa Elena (90)	Q. El Ahorcado Q. El Ñato Q. El Rosario Q. La Aguacatala Q. La Castro Q. La Escopetería Q. La Honda Q. La Hondita Q. La Paulita Q. La Presidenta Q. La Rafita Q. la Rafita - Chorro Hondo Q. La Seca Q. La Volcana Q. Piedra Gorda Q. Piedras Blancas Q. Santa Elena Q. Zuñiga	64,82	4,27	3,33
	Total general	209,40	13,11	8,44

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Los corregimientos de San Antonio de Prado y Santa Elena son los que presentan cuencas con mayor área en las categorías de amenaza alta y media por avenidas torrenciales, con 77,16 ha y 69,10 ha, respectivamente, seguidas de San Sebastián de Palmitas, San Cristóbal y Altavista (*Ilustración 231*).

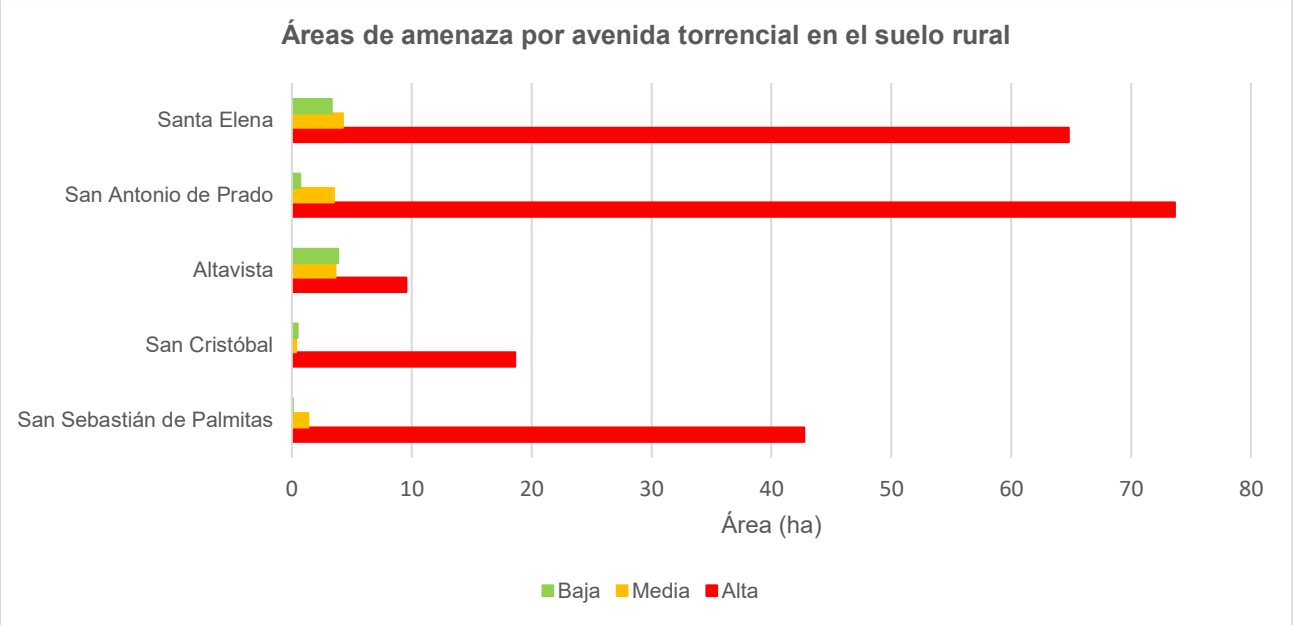


Ilustración 231. Distribución de la amenaza por avenidas torrenciales en el suelo rural del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

9.12 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES DEL SUELO SUBURBANO

En la Tabla 75 se presentan las áreas de las categorías alta, media y baja de amenaza por avenidas torrenciales para los polígonos definidos en el POT como suelo suburbano del Distrito de Medellín que tienen afectación por las cuencas priorizadas, esta distribución incluye las categorías de desarrollo restringido relacionadas con áreas destinadas a la parcelación de vivienda campestre, áreas para la localización de equipamientos y suelos suburbanos propiamente dichos (Ilustración 232).

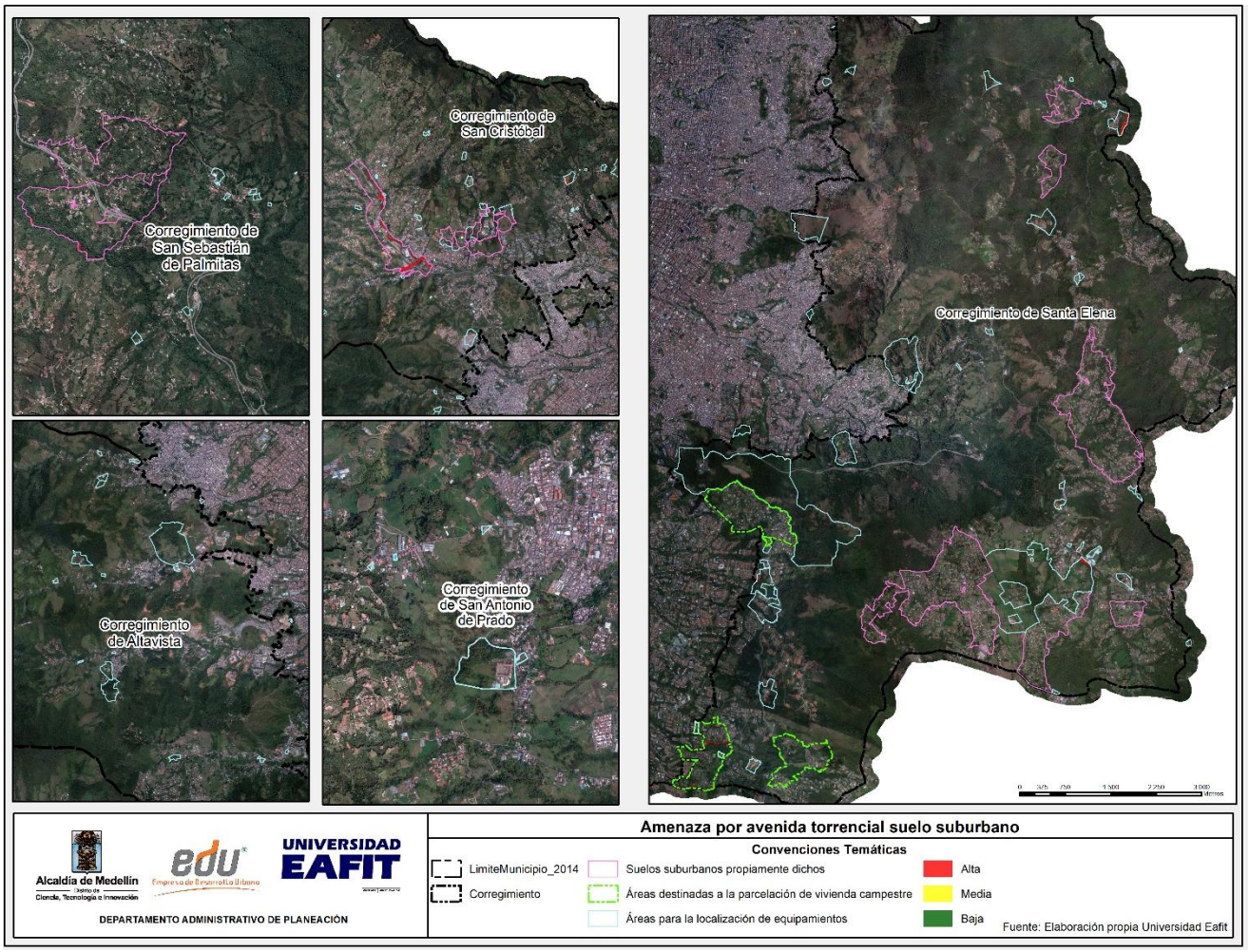


Ilustración 232. Zonificación de la amenaza por avenida torrencial en el suelo suburbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Tabla 75. Áreas de amenaza por avenidas torrenciales del suelo suburbano del Distrito de Medellín

Área Suburbana	Cuenca	Amenaza alta Área (ha)	Amenaza media Área (ha)	Amenaza baja Área (ha)
Conexión Aburrá Cauca	Q. La Iguana Q. La Potrera Q. Potreritos	10,88	0,00	0,00
Santa Elena, Sector Central	Q. Santa Elena	0,18	0,00	0,00
El Tesoro	Q. La Aguacatala Q. La Paulita Q. Zuñiga	1,46	0,01	0,00
San José de Manzanillo	Q. La Guayabala	0,03	0,00	0,00
Aguas Frías, San Pablo	Q. La Guayaba Q. La Picacha	0,07	0,00	0,00
Pedregal Alto	Q. El Hato - La Guayaba	0,27	0,00	0,00

Área Suburbana	Cuenca	Amenaza alta Área (ha)	Amenaza media Área (ha)	Amenaza baja Área (ha)
Corazón - El Morro	Q. Ana Diaz	0,07	0,00	0,00
La Aldea	Q. La Sucia	0,51	0,03	0,00
La Loma	Q. La Leonarda	0,01	0,00	0,00

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

El suelo suburbano con áreas destinadas a la parcelación de vivienda campestre, áreas para la localización de equipamientos y suelos suburbanos propiamente dichos que tiene mayor ocupación por polígonos de amenaza alta y media por avenidas torrenciales es Conexión Aburrá – Cauca con una ocupación de 10,88 ha, seguida por el suelo suburbano de El Tesoro con 1,46 ha, el resto de los suelos suburbanos no superan 1 ha por polígono en esta categoría de amenaza (Ilustración 233).

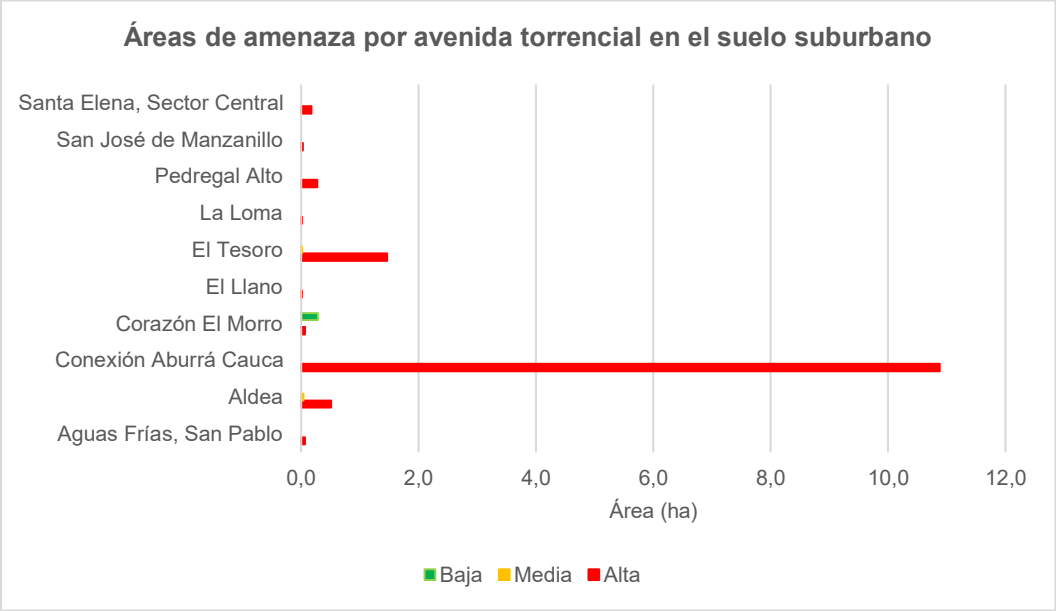


Ilustración 233. Distribución de la amenaza por avenidas torrenciales en el suelo rural del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Otra de las categorías de desarrollo restringido del suelo suburbano corresponde con los centros poblados, en estos predomina la categoría de amenaza alta por avenida torrencial al interior de los polígonos. Los centros poblados de Aguas Frías – San Pablo, Santa Elena – sector central y La Palma presentan las mayores áreas en esta categoría, con 5,21 ha, 4,39 ha y 3,27 ha, seguidas de Pajarito con 2,61 ha, Corazón – El Morro con 1,81 ha y San José del Manzanillo con 1,73 ha como se muestra en la Ilustración 234 y la Tabla 76.

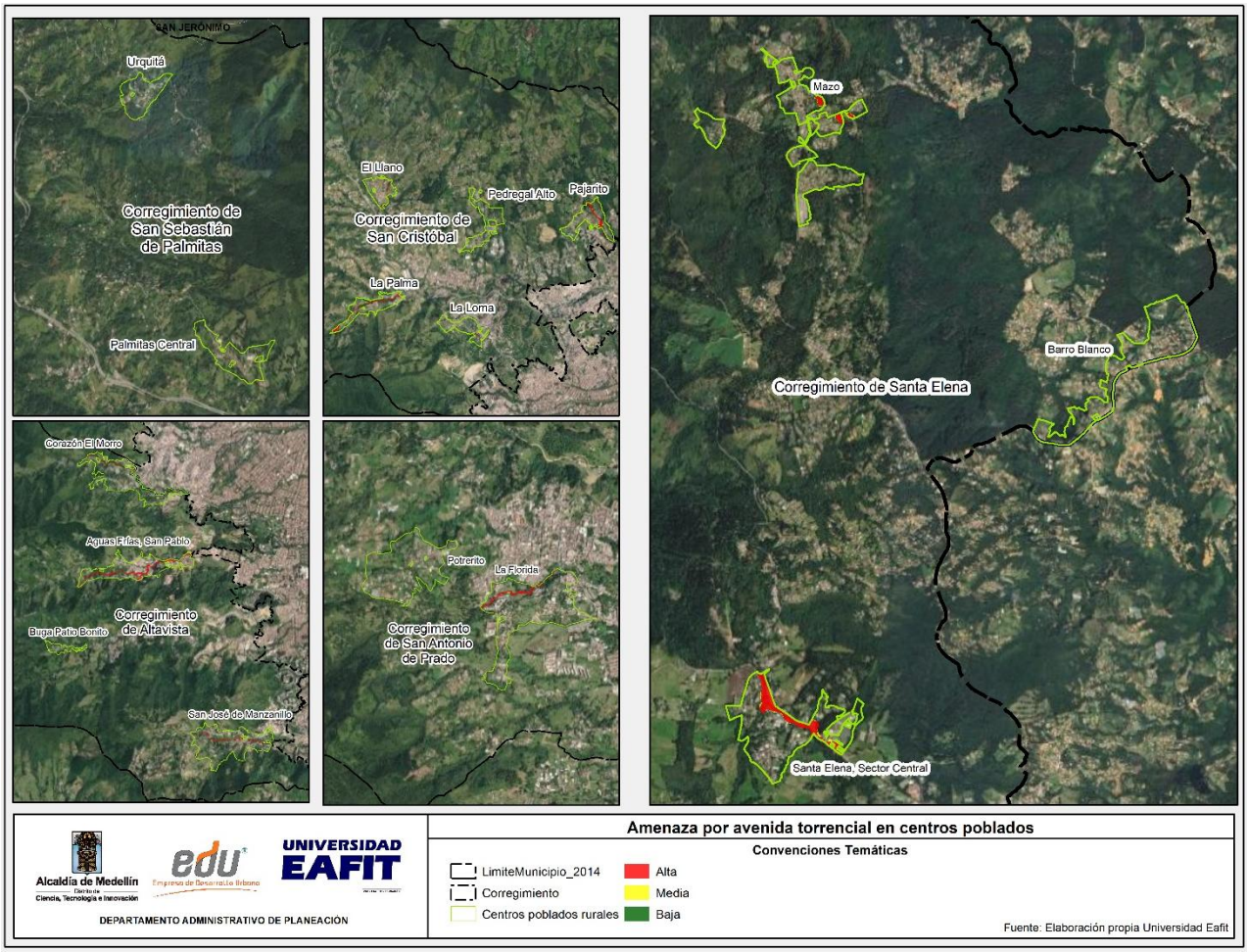


Ilustración 234. Amenaza por avenida torrencial en centros poblados del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 76. Amenaza por avenida torrencial en centros poblados del Distrito de Medellín

Corregimiento	Centro Poblado	Amenaza alta Área (ha)	Amenaza media Área (ha)	Amenaza baja Área (ha)
Altavista	Corazón El Morro	1,818	0,000	2,574
	Aguas Frías, San Pablo	5,213	0,000	0,000
	San José del Manzanillo	1,732	0,034	0,000
	Buga Patio Bonito	0,000	0,000	0,000
San Sebastián de Palmitas	Palmitas central	0,000	0,000	0,000
	Urquitá	0,000	0,000	0,000
San Antonio de Prado	Potrerito	0,000	0,000	0,000
	La Florida	1,027	0,025	0,000
San Cristóbal	La Palma	3,277	0,126	1,625
	El Llano	0,856	0,000	0,000

Corregimiento	Centro Poblado	Amenaza alta Área (ha)	Amenaza media Área (ha)	Amenaza baja Área (ha)
	Pedregal Alto	0,000	0,000	0,000
	Pajarito	2,615	0,302	0,000
	La Loma	0,433	0,000	0,000
Santa Elena	Santa Elena, sector central	4,395	0,301	0,000
	Barro Blanco	0,000	0,000	0,000
	Mazo, Los Vasquez	0,000	0,000	0,000
	Mazo	0,880	0,112	0,105

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

Cabe destacar que en los centros poblado del corregimiento de San Sebastián de Palmitas no se presenta amenaza por avenida torrencial.

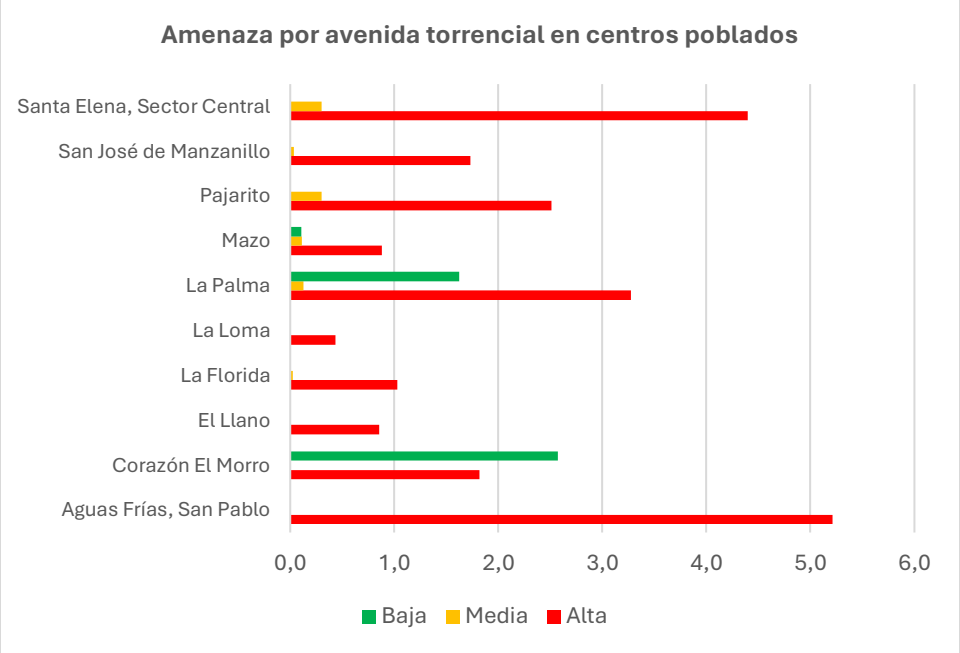


Ilustración 235. Distribución de la amenaza por avenida torrencial en los centros poblados del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

9.13 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES DEL SUELO URBANO

En la Tabla 77 se presentan las cuencas y el área de las categorías alta, media y baja de amenaza por avenidas torrenciales para cada uno de los polígonos definidos en el POT como suelo urbano del Distrito de Medellín (Ilustración 236).

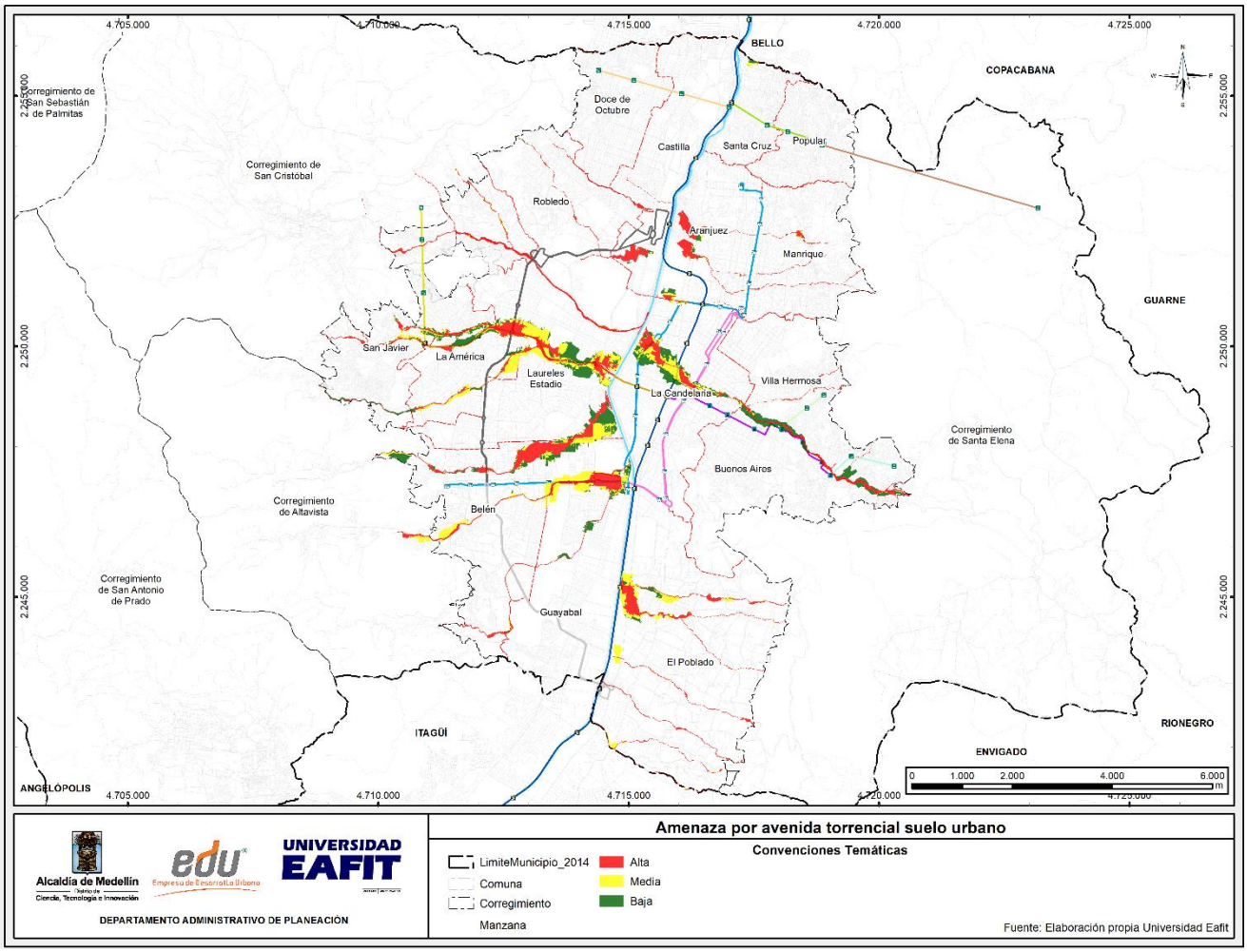


Ilustración 236. Amenaza por avenidas torrenciales del suelo urbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 77. Amenaza por avenidas torrenciales del suelo urbano del Distrito de Medellín

Área Urbana - Comuna	Localización de la amenaza	Amenaza alta Área (ha)	Amenaza media Área (ha)	Amenaza baja Área (ha)
Comuna 1- Popular	Q. Cañaveral - El Zancudo Q. La Seca	1,55	0,08	0,01
Comuna 2- Santa Cruz	Q. La Seca	0,80	0,97	0,85
Comuna 3 - Manrique	Q. Canaveral - El Zancudo Q. El Ahorcado Q. La Bermejala Q. La Chorrera - El Molino Q. La Honda Q. La Hondita	8,57	0,55	0,23
Comuna 4 - Aranjuez	Q. Canaveral - El Zancudo	23,14	3,39	4,57

Área Urbana - Comuna	Localización de la amenaza	Amenaza alta Área (ha)	Amenaza media Área (ha)	Amenaza baja Área (ha)
	Q. El Ahorcado Q. La Bermejala Q. La Chorrera - El Molino Q. La Honda			
Comuna 5 - Castilla	Q. La Cantera Ramal Sur Q. La Madera Q. La Quintana Q. Malpaso	13,29	0,13	1,34
Comuna 6 – 12 de Octubre	Q. La Madera Q. La Quintana	1,50	0,12	0,00
Comuna 7 - Robledo	Q. La García Q. La Gómez Q. La Iguana Q. La Moñonga Q. La Puerta - Borbollona Q. La Quintana Q. Malpaso	27,07	1,35	0,56
Comuna 8 – Villa Hermosa	Q. El Ahorcado Q. El Ñato Q. La Castro Q. La Rafita Q. la Rafita - Chorro Hondo Q. Santa Elena	12,01	0,44	13,25
Comuna 9 – Buenos Aires	Q. Santa Elena	9,21	0,62	13,12
Comuna 10 – La Candelaria	Q. El Ahorcado	20,61	23,01	24,96
Comuna 11 - Laureles	Q. Ana Diaz Q. La Hueso Q. La Iguana Q. La Picacha	42,11	55,67	40,76
Comuna 12 – La América	Q. Ana Diaz Q. La Hueso Q. La Pelahueso Q. La Picacha	18,05	19,55	14,49
Comuna 13 – San Javier	Q. Ana Diaz Q. La Hueso Q. La Iguana Q. La Leonarda Q. La Pelahueso	15,72	6,48	8,29
Comuna 14 – El Poblado	Q. La Aguacatala Q. La Escopetería Q. La Paulita Q. La Poblada Q. La Presidenta	43,22	28,38	4,21

Área Urbana - Comuna	Localización de la amenaza	Amenaza alta Área (ha)	Amenaza media Área (ha)	Amenaza baja Área (ha)
	Q. La Volcana Q. Zuñiga			
Comuna 15 - Guayabal	Q. Altavista Q. La Guayabala	21,32	14,38	7,33
Comuna 16 - Belén	Q. Altavista Q. La Guayabala Q. La Picacha	49,09	35,11	20,44
Cabecera San Cristóbal (60)	Q. Aguas Frías Q. El Hato - La Guayaba Q. La Iguana Q. La Leonarda Q. La Potrera	11,74	0,76	0,03
Cabecera Altavista (70)	Q. Altavista	2,46	0,06	0,00
Cabecera San Antonio de Prado (80)	Q. Doña María Q. La Cañada Q. La Limona Q. La Manguala Q. La Mauala	19,02	1,81	1,90

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

La comuna 11 Laureles Estadio es la que mayor área presenta en las categorías de amenaza alta y media con 97,78 ha seguida en orden por las comunas 16 Belén, 14 El Poblado y 10 La Candelaria que presentan áreas 84,19 ha, 71,61 ha y 43,62 ha respectivamente y las comunas 12,15, 7, 4 y 13 presenta áreas que oscilan entre 37,59 ha y 22,21 ha; y las comunas 5,8,9,3,2,1 y 6 tiene áreas inferiores a 13, 42 ha en estas dos categorías de amenaza (Ilustración 237).

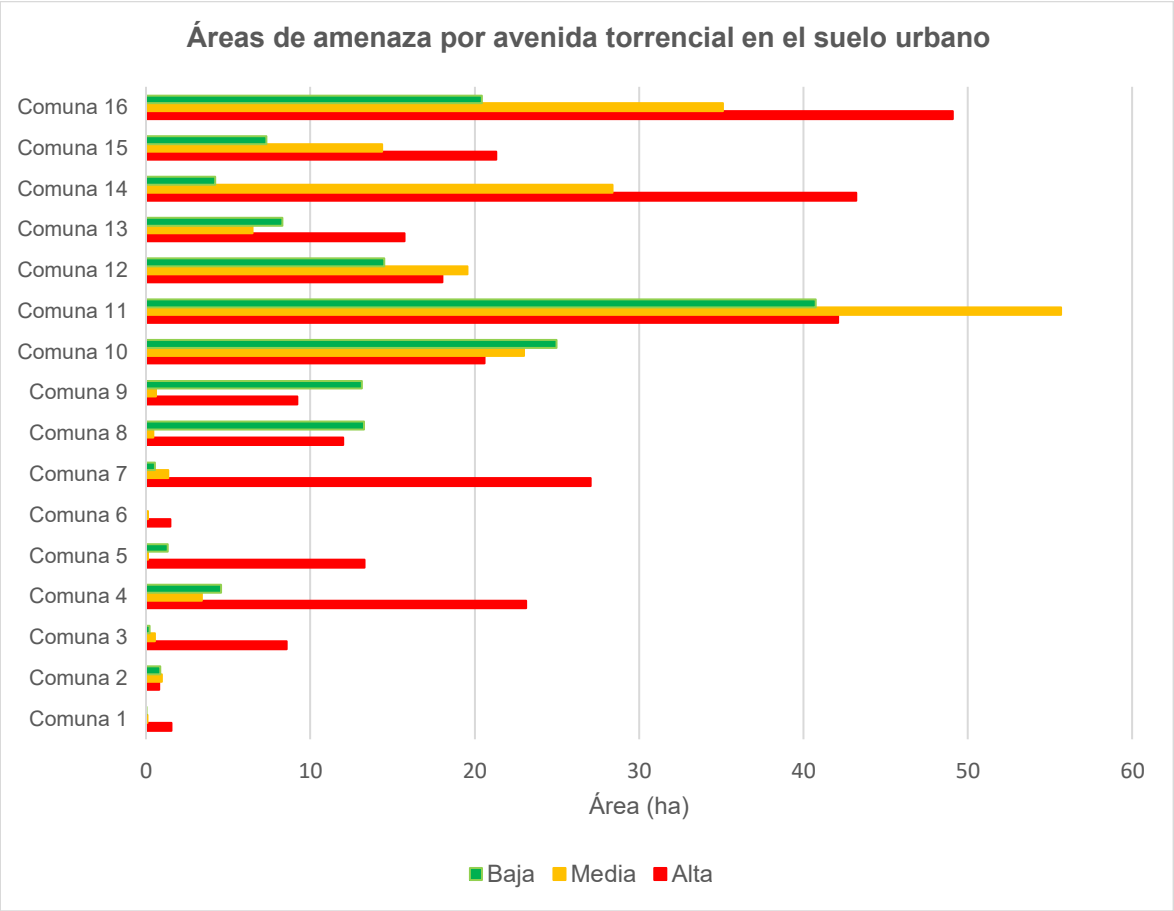


Ilustración 237. Amenaza por avenidas torrenciales en el suelo urbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

9.14 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES DEL SUELO DE EXPANSIÓN

En la Tabla 78 se presentan las áreas de las categorías alta, media y baja de amenaza por avenidas torrenciales para cada uno de los polígonos definidos en el POT como suelo de expansión del Distrito de Medellín donde se tiene influencia por las cuencas priorizadas (Ilustración 238).

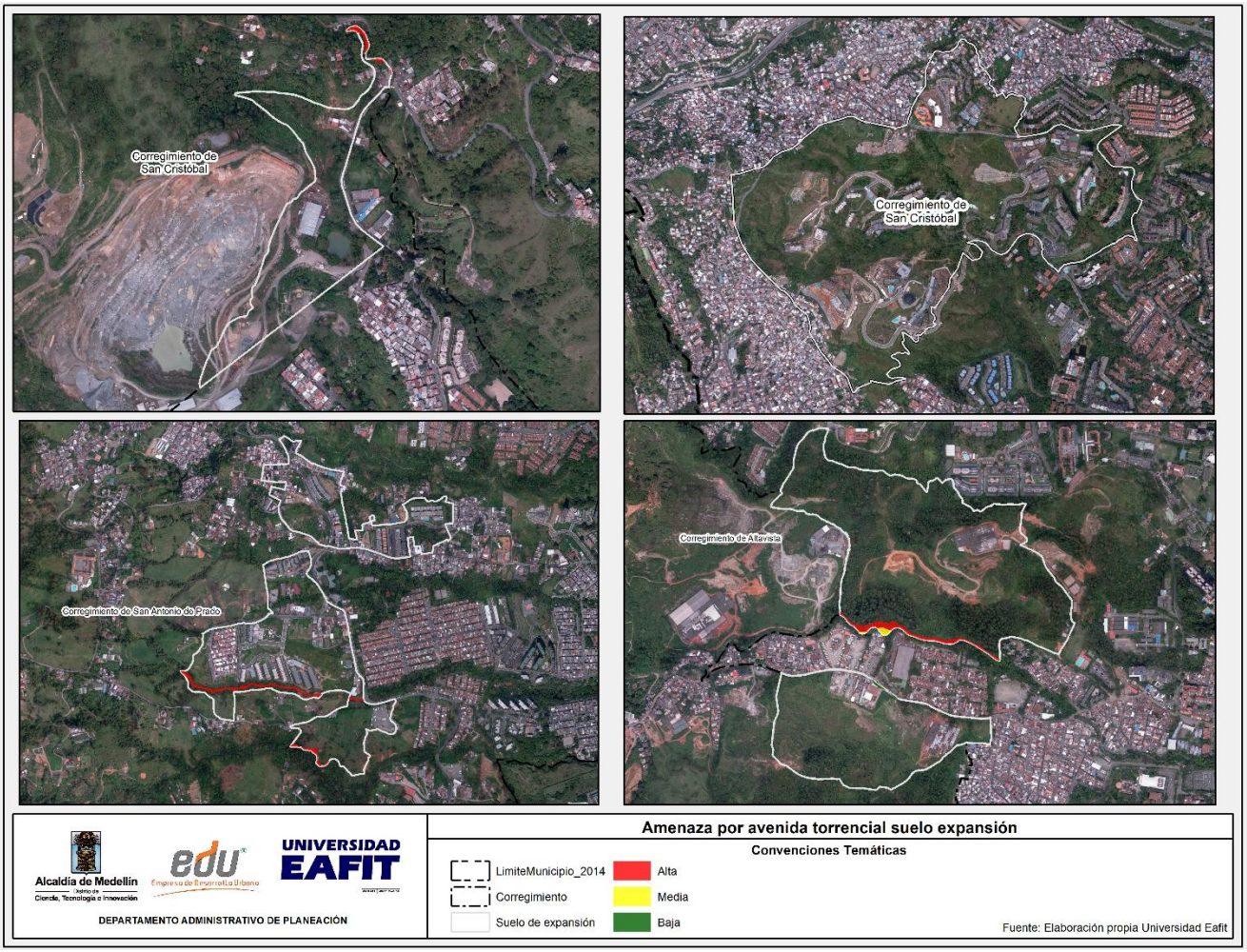


Ilustración 238. Amenaza por avenidas torrenciales del suelo de expansión del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Los polígonos de Eduardo Santos, El Noral y La Florida presentan áreas en amenaza alta y media por avenidas torrenciales y en los cuales cubren pequeñas áreas que no superan las 0,65 ha (Ilustración 239).

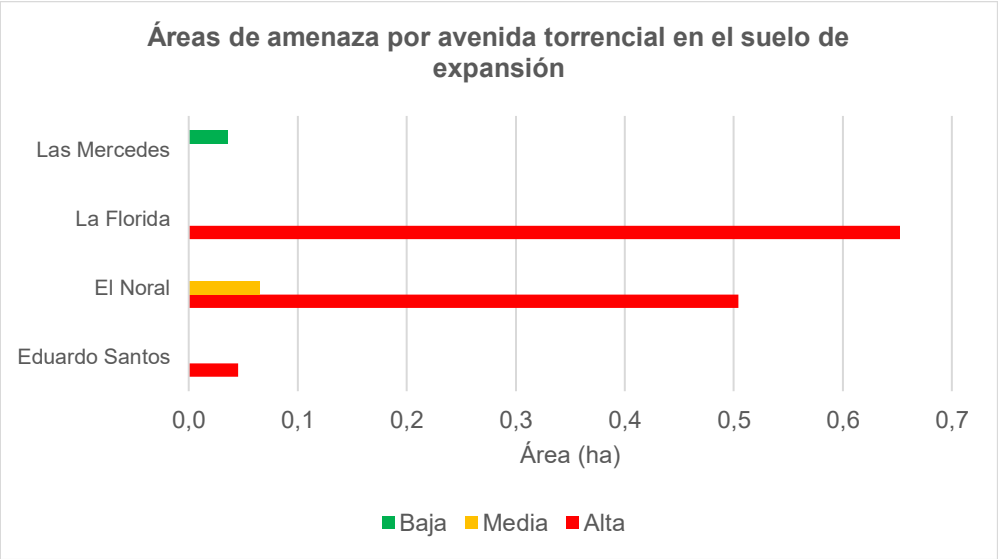


Ilustración 239. Amenaza por avenidas torrenciales en el suelo de expansión del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 78. Amenaza por avenidas torrenciales de expansión del Distrito de Medellín

Área Expansión	Cuenca	Amenaza alta Área (ha)	Amenaza media Área (ha)	Amenaza baja Área (ha)
El Noral	Q. La Picacha	0,50	0,06	0,00
La Florida	Q. La Limona Q. La Manguala Q. La Mauala	0,65	0,00	0,00
Eduardo Santos	Q. La Leonarda	0,05	0,00	0,00
Las Mercedes	Caño Las Violetas	0,00	0,00	0,04

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

10 ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES

Las Áreas con Condición de Amenaza (ACA), son las zonas o áreas del territorio municipal zonificadas como de amenaza alta y media en las que se establezca en la revisión o expedición de un nuevo POT la necesidad de clasificarlas como suelo urbano, de expansión urbana, rural suburbano o centros poblados rurales para permitir su desarrollo (Decreto 1077 de 2015).

La delimitación de las zonas con condición de amenaza se llevó a cabo a partir del mapa final de amenaza por fenómeno (inundación y avenida torrencial), se realizó la intersección de las zonas de amenaza alta y media con los polígonos de zonas sin construcciones (zonas verdes) y apoyados de la ortofoto del distrito del año 2024, a este resultado se le superponen y eliminan los polígonos con estudio de detalle, zona de alto riesgo no mitigables y algunos polígonos con obras estructurales de mitigación definidas por el Departamento Administrativo de planeación (DAP) y el departamento administrativo de gestión de riesgo de desastres DAGRD. Finalmente, se depuraron los polígonos aislados que cubren un área inferior a 400 m^2 para movimientos en masa y 64 m^2 para inundaciones y avenidas torrenciales, estas áreas corresponden con la unidad mínima cartografiable definida para las escalas 1:5.000 y 1:2.000 en el distrito de acuerdo con los Estándares básicos para el manejo de información geográfica de la Alcaldía de Medellín (DAP, 2025).

Para realizar la codificación de las áreas en condición de amenaza se realiza el cruce con la clasificación del suelo y la división político-administrativa (códigos de barrios y veredas según DAP). El código se compone de una estructura alfanumérica que se compone de 5 a 6 elementos según el fenómeno:

[Fenómeno] + [clasificación del suelo] + [Tipo] + [Comuna] + [Barrio/Vereda] + [Consecutivo]

Fenómeno: Solo aplica para Inundación (**I**) y Avenida Torrencial (**T**). Si es Movimiento en Masa, este espacio queda vacío.

Clasificación del suelo: la sigla según la siguiente clasificación

UR Suelo urbano

CG Suelo urbano de cabecera corregimental (Altavista, San Antonio de Prado, San Cristóbal)
SU Suelo suburbano
EX Suelo de expansión
RR Suelo rural

Tipo: Indica que corresponde a la amenaza (**A**)

Ubicación: Códigos oficiales de comuna y barrio/vereda.

Consecutivo: Número único del polígono

A continuación, se muestran ejemplos para un mismo sector (Corregimiento Altavista, Sector Central):

Tabla 79. Ejemplo codificación áreas con condición de amenaza (ACA) del Distrito de Medellín

Fenómeno	Código Generado
Movimiento en Masa	CGA_70_7005_7
Inundación	ICGA_70_7005_7
Avenida Torrencial	TCGA_70_7005_7

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Es importante resaltar que las áreas con condición de amenaza para inundaciones y avenidas torrenciales definidas en los estudios básicos de amenazas serán depuradas por el DAP para la memoria justificativa, teniendo en cuenta los suelos de protección y los cambios en los usos del suelo que apliquen para posibles desarrollos.

Por su parte, las Áreas con Condición de Riesgo (ACR), corresponden a las zonas o áreas del territorio municipal clasificadas como de amenaza alta que estén urbanizadas, ocupadas o edificadas, así como en las que se encuentren elementos del sistema vial, equipamientos (salud, educación, otros) e infraestructura de servicios públicos (Decreto 1077 de 2015).

La definición de las áreas en condición de riesgo se realiza con el cruce de la amenaza en categoría alta por fenómeno y con las áreas identificadas con construcciones (Apoyados con imágenes áreas 2024 del distrito, la base catastral y eliminando los espacios verdes urbanos), a este resultado se le superponen y eliminan los polígonos con estudio de detalle, zona de alto riesgo no mitigables y algunos polígonos con obras estructurales de mitigación definidas por el Departamento Administrativo de planeación (DAP) y el departamento administrativo de gestión de riesgo de desastres DAGRD. Finalmente, se depuraron los polígonos aislados que cubren un área inferior a 400

m^2 para movimientos en masa y 64 m^2 para inundaciones y avenidas torrenciales, estas áreas corresponden con la unidad mínima cartografiable definida para las escalas 1:5.000 y 1:2.000 en el distrito de acuerdo con los Estándares básicos para el manejo de información geográfica de la Alcaldía de Medellín (DAP, 2025).

La codificación del riesgo sigue la misma lógica que la amenaza, con la diferencia de que en el **paso 3**, el tipo corresponde a Riesgo (**R**)

La codificación se estructura de la siguiente manera para áreas en condición de riesgo por movimientos en masa si se fuera para la cabecera corregimental del corregimiento Altavista, sector central:

Tabla 80. Ejemplo de codificación áreas con condición de riesgo (ACR) del Distrito de Medellín

Fenómeno	Código Generado
Movimiento en Masa	CGR_70_7005_7
Inundación	ICGR_70_7005_7
Avenida Torrencial	TCGR_70_7005_7

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Las áreas con condición de amenaza y condición de riesgo se definieron para cada una de las clases de suelo (urbano, suburbano y expansión) y para el suelo rural. ~~solo se delimitaron áreas con condición de riesgo.~~

10.1 ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y RIESGO DEL SUELO RURAL (ACRR)

La codificación de cada polígono (ACRR) por inundaciones se realizó de acuerdo con: Prefijo IRR (Riesgo Rural) + Código corregimiento (xx) + Código vereda (xxxx) + Consecutivo del polígono por vereda (xx).

La codificación de cada polígono (ACRR) por avenidas torrenciales se realizó de acuerdo con: Prefijo TRR (Riesgo Rural) + Código corregimiento (xx) + Código vereda (xxxx) + Consecutivo del polígono por vereda (xx).

La codificación de cada polígono (ACAR) por inundaciones se realizó de acuerdo con: Prefijo IRRA (Rural Amenaza) + Código corregimiento (xx) + Código vereda (xxxx) + Consecutivo del polígono por vereda (xx).

La codificación de cada polígono (ACRR) por avenidas torrenciales se realizó de acuerdo con: Prefijo TRRA (Rural Amenaza) + Código corregimiento (xx) + Código vereda (xxxx) + Consecutivo del polígono por vereda (xx).

En la Tabla 81 se presentan las cuencas y las áreas (ha) de las Áreas con Condición de Riesgo Rural (ACRR) y Áreas con Condición de Amenaza Rural (ACAR) por inundaciones y avenidas torrenciales (Ilustración 240 a Ilustración 243).

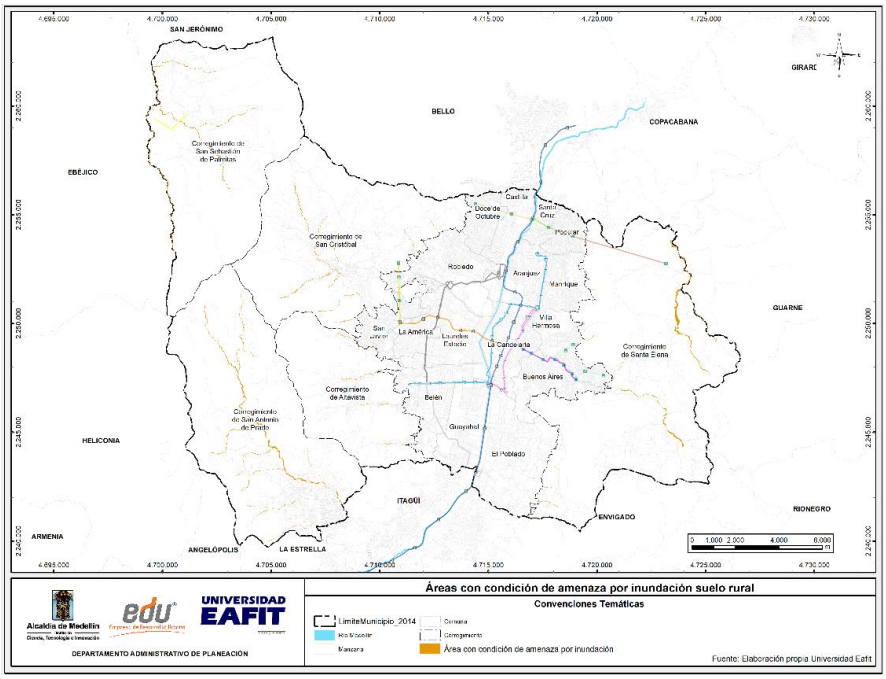


Ilustración 240. Áreas con condición de amenaza por inundaciones del suelo rural del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

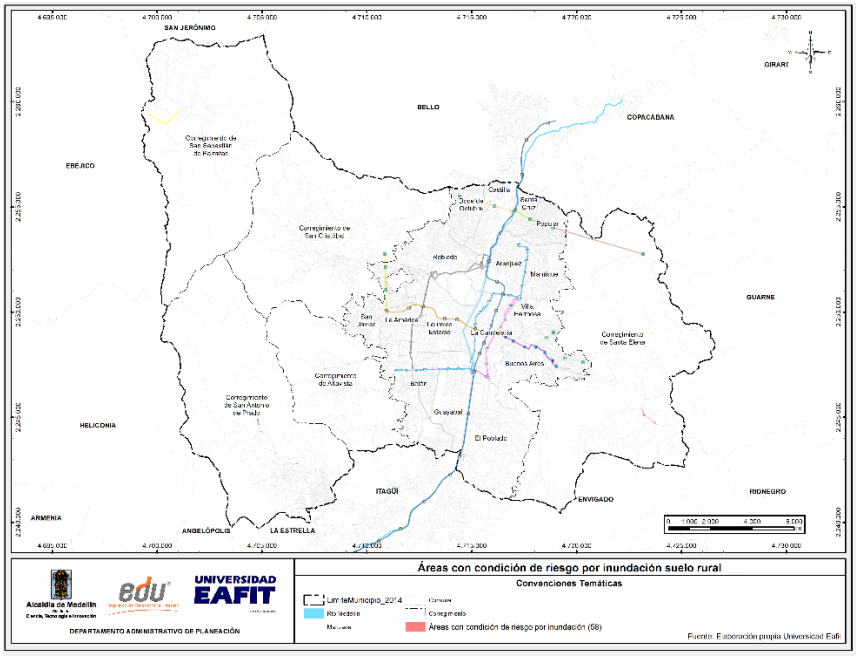


Ilustración 241. Áreas con condición de riesgo por inundaciones del suelo rural del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

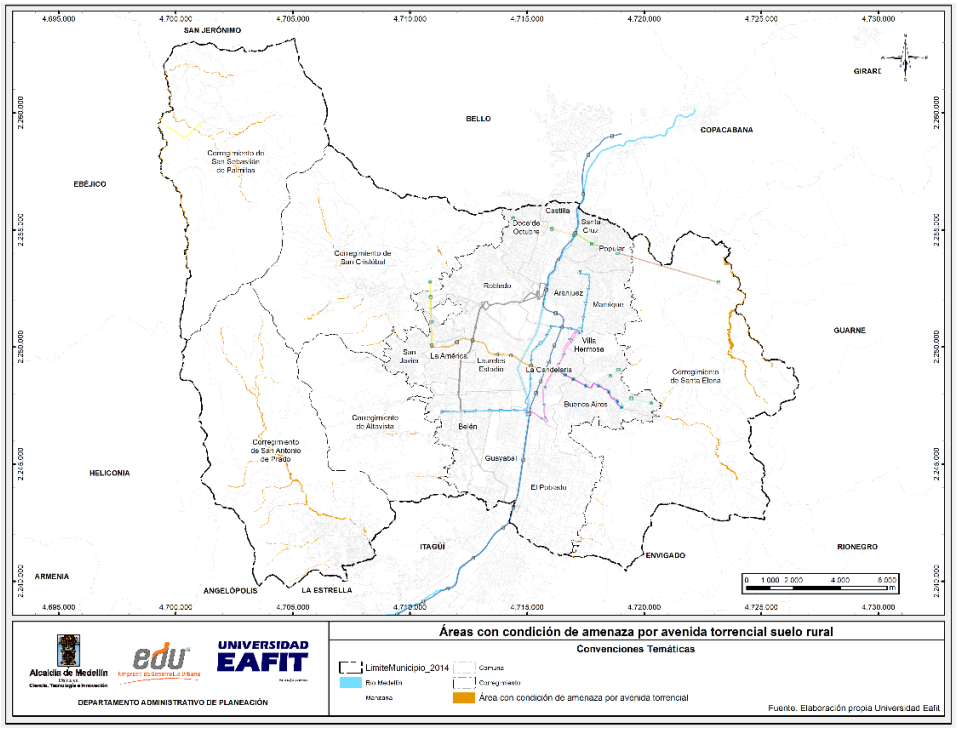


Ilustración 242. Áreas con condición de amenaza por avenidas del suelo rural del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

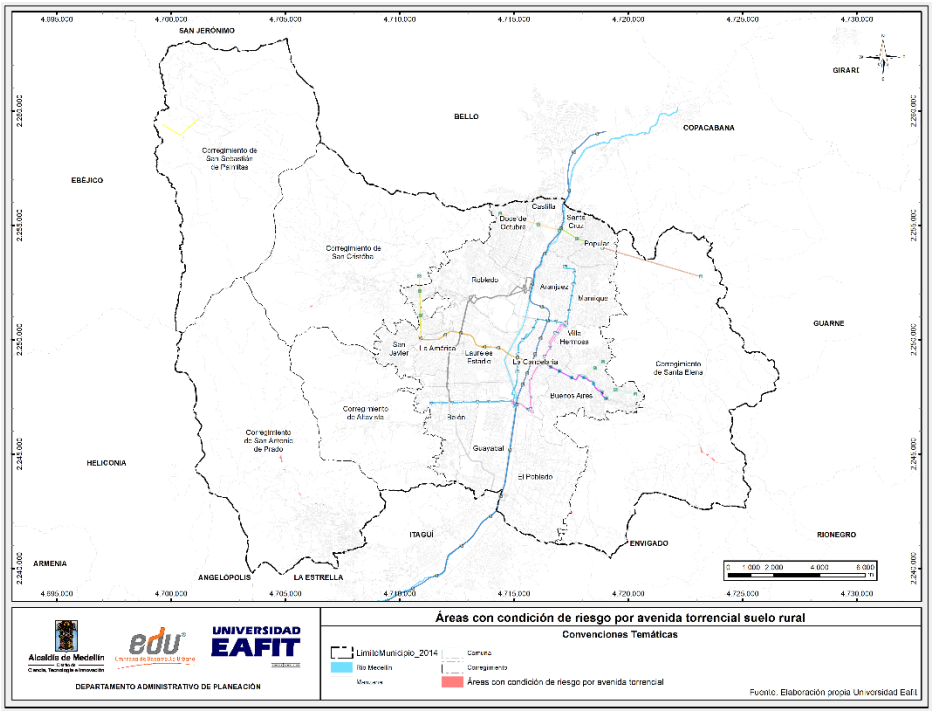


Ilustración 243. Áreas con condición de riesgo por avenidas del suelo rural del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 81. Áreas con condición de riesgo rural y Áreas con condición de amenaza de los corregimientos del Distrito de Medellín

Corregimiento	Cuenca	Áreas con condición de amenaza - inundaciones Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo - inundaciones Área (ha)	Áreas con condición de amenaza – avenidas torrenciales Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo – avenidas torrenciales Área (ha)
San Sebastián de Palmitas (50)	Q. La Frisola Q. La Lejía Q. La Sucia Q. Miserenga	38,6	0,0	44,1	0,0
San Cristóbal (60)	Q. Agua Frías Q. La Arenera Q. La García Q. La Hueso Q. La Iguana Q. La Leonarda Q. La Madera Q. La Moñonga Q. La Potrera Q. La Puerta Q. Potreritos	14,5	0,07	15,9	0,2
Altavista (70)	Q. Altavista Q. Ana Diaz Q. La Guayaba Q. La Guayabala Q. La Picacha	4,7	0,97	3,0	1,0
San Antonio de Prado (80)	Q. Doña María Q. La Astillera Q. La Candela Q. La Chorrera San Antonio Prado Q. La Despensa Q. La Larga Q. La Limona Q. La Manguala Q. La Mauala Q. La Zorrita Q. Minitas	62,5	4,43	71,7	3,0

Corregimiento	Cuenca	Áreas con condición de amenaza - inundaciones Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo - inundaciones Área (ha)	Áreas con condición de amenaza – avenidas torrenciales Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo – avenidas torrenciales Área (ha)
Santa Elena (90)	Q. El Ahorcado Q. El Ñato Q. El Rosario Q. La Aguacatala Q. La Castro Q. La Escopetería Q. La Honda Q. La Hondita Q. La Paulita Q. La Presidenta Q. La Rafita Q. la Rafita - Chorro Hondo Q. La Seca Q. La Volcana Q. Piedra Gorda Q. Piedras Blancas Q. Santa Elena Q. Zuñiga	51,1	1,23	65,7	1,8

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

El corregimiento de San Antonio de Prado es el que presentan un área mayor con condición de amenaza por inundación en lo rural (ACAR), con aproximadamente 62,5 ha, seguido de Santa Elena con 51,1 ha, San Sebastián de Palmitas con 38,6 ha, San Cristóbal con 14,5 ha y Altavista con 4,7 ha por lo que es el corregimiento con menor área bajo esta condición (Ilustración 244).

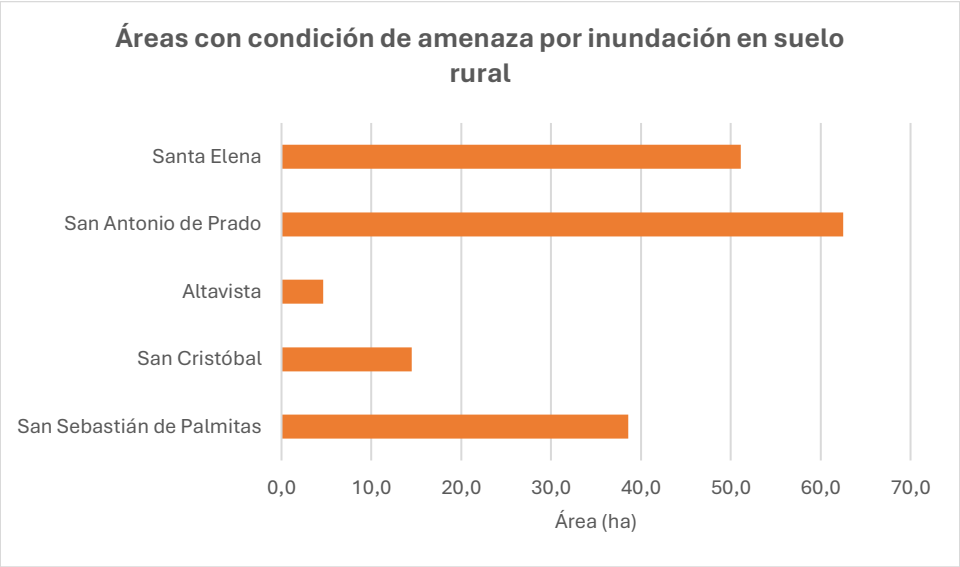


Ilustración 244. Áreas con condición de amenaza por inundaciones del suelo rural del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

El corregimiento de San Antonio de Prado es el que presentan un área mayor en la categoría de ACR por inundación en lo rural propiamente dicho (ACRR), con aproximadamente 4,43 ha, seguido de Santa Elena con 1,23 ha, Altavista con 0,97 ha y San Cristóbal con 0,07 ha; en el corregimiento de San Sebastián de Palmitas no se identificaron áreas con condición de riesgo rural por este fenómeno *(Ilustración 245)*.

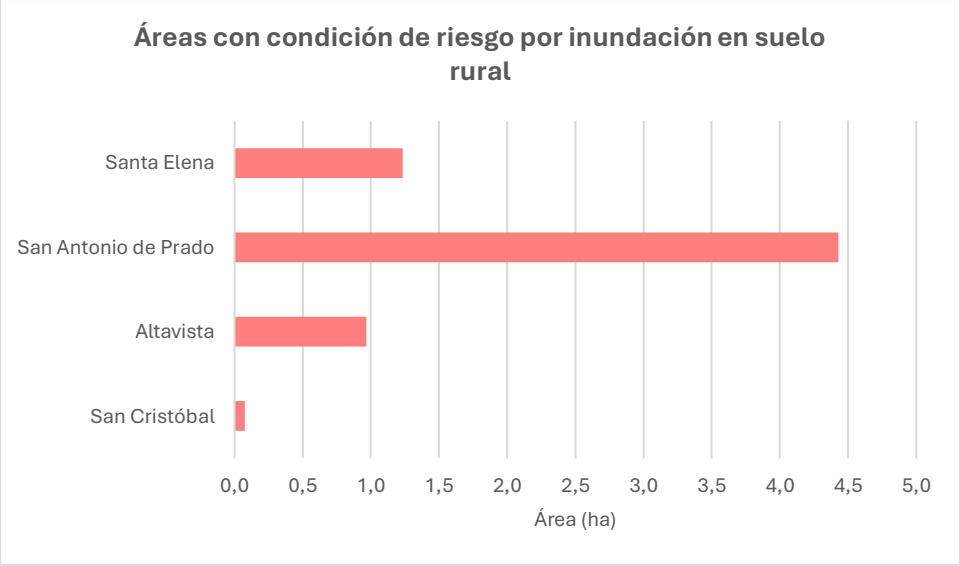


Ilustración 245. Áreas con condición de riesgo por inundación en el suelo de rural del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

El corregimiento de San Antonio de Prado es el que presentan un área mayor con condición de amenaza por avenidas torrenciales en lo rural (ACAR), con aproximadamente 71,7 ha, seguido Santa Elena con 65,7 ha, San Sebastián de Palmitas con 44,1 ha, San Cristóbal con 15,9 ha y Altavista con 3 ha por lo que es el corregimiento con menor área bajo esta condición (Ilustración 244).

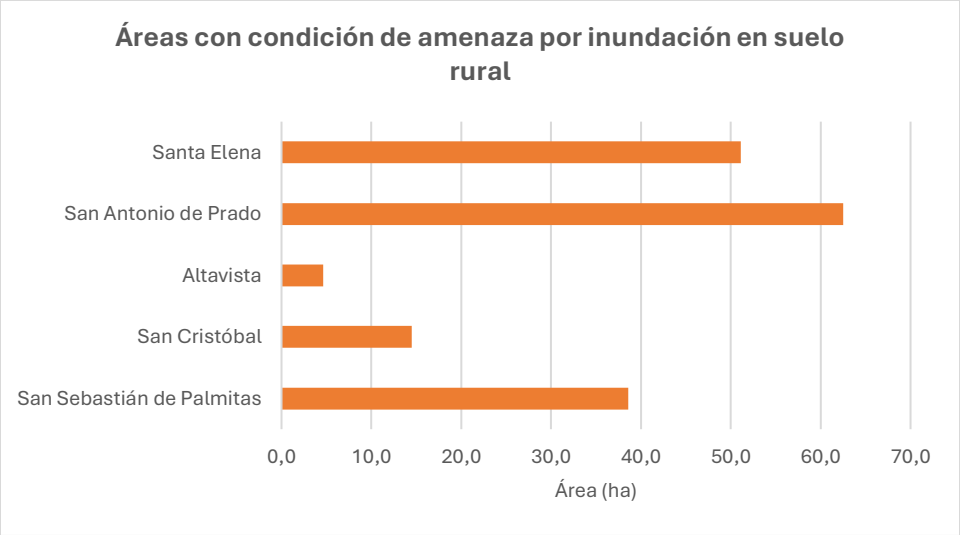


Ilustración 246. Áreas con condición de amenaza por avenida torrencial del suelo rural del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

El corregimiento de San Antonio de Prado es el que presentan un área mayor en la categoría de ACR en lo rural por avenida torrencial (ACRR), con aproximadamente 3,02 ha, seguido de Santa Elena con 1,86 ha, Altavista con 1,09 ha, San Cristóbal con 0,23 ha y San Sebastián de Palmitas con 0,08 ha; siendo el corregimiento con menor área en esta condición (*Ilustración 247*).

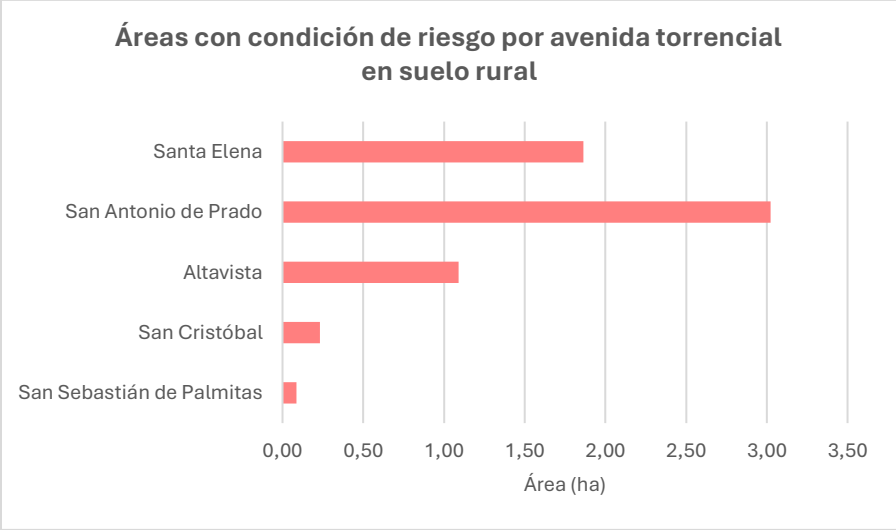


Ilustración 247. Áreas con condición de riesgo por avenidas torrenciales en el suelo de rural del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

La zonificación de las ACRR y las ACAR se encuentra en la GDB anexa y la codificación de cada polígono se presentan el Anexo 7. Zonificación de ACA y ACR por inundaciones y avenidas torrenciales.

10.2 ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA (ACA) Y ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO (ACR) POR INUNDACIÓN Y AVENIDAS TORRENCIALES DEL SUELO SUBURBANO

La codificación de cada polígono (ACA) por inundación se realizó de acuerdo con: Prefijo ISUA (Suburbano Amenaza) + Código corregimiento (xx) + Código vereda (xxxx) + Consecutivo del polígono por vereda (xx).

La codificación de cada polígono (ACR) por inundación se realizó de acuerdo con: Prefijo ISUR (Suburbano Riesgo) + Código corregimiento (xx) + Código vereda (xxxx) + Consecutivo del polígono por vereda (xx).

La codificación de cada polígono (ACA) por avenidas torrenciales se realizó de acuerdo con: Prefijo TSUA (Suburbano Amenaza) + Código corregimiento (xx) + Código vereda (xxxx) + Consecutivo del polígono por vereda (xx).

La codificación de cada polígono (ACR) por avenidas torrenciales se realizó de acuerdo con: Prefijo TSUR (Suburbano Riesgo) + Código corregimiento (xx) + Código vereda (xxxx) + Consecutivo del polígono por vereda (xx).

En la Tabla 82 se presentan las áreas en cada una de las condiciones por polígono suburbano, esta distribución incluye las categorías de desarrollo restringido relacionadas con áreas destinadas a la parcelación de vivienda campestre, áreas para la localización de equipamientos y suelos suburbanos propiamente dichos (Ilustración 248 a Ilustración 251).

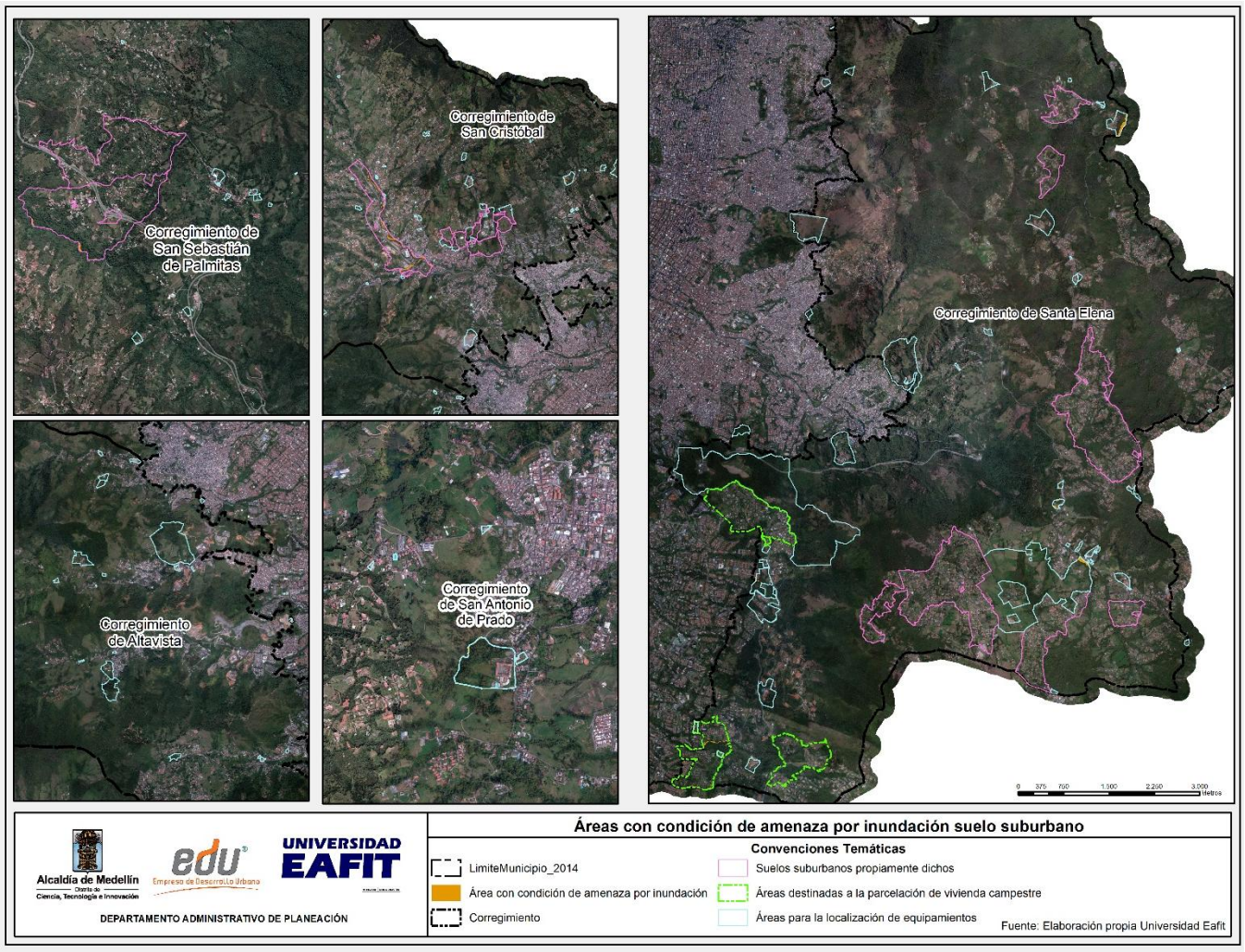


Ilustración 248. Áreas con condición de amenaza por inundación del suelo suburbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

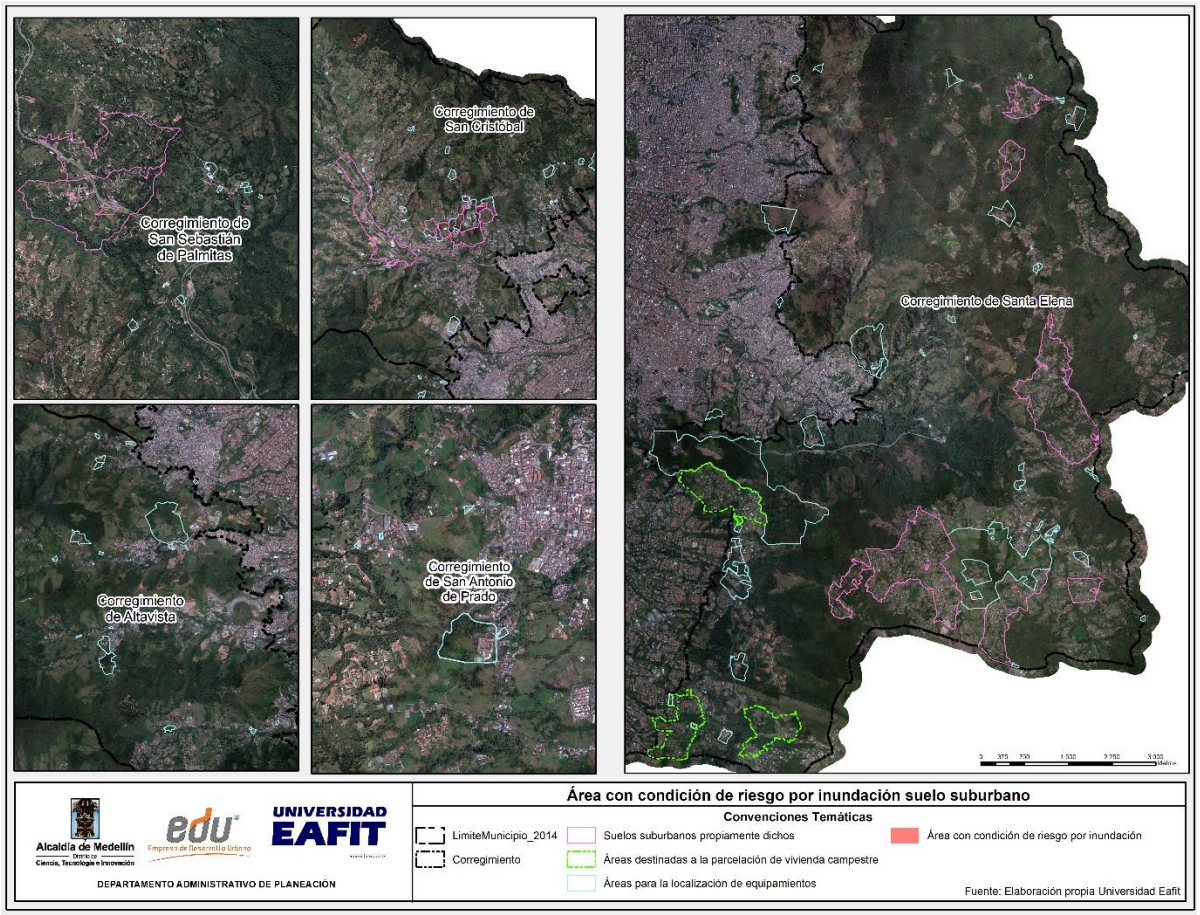


Ilustración 249. Áreas con condición de riesgo por inundaciones del suelo suburbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

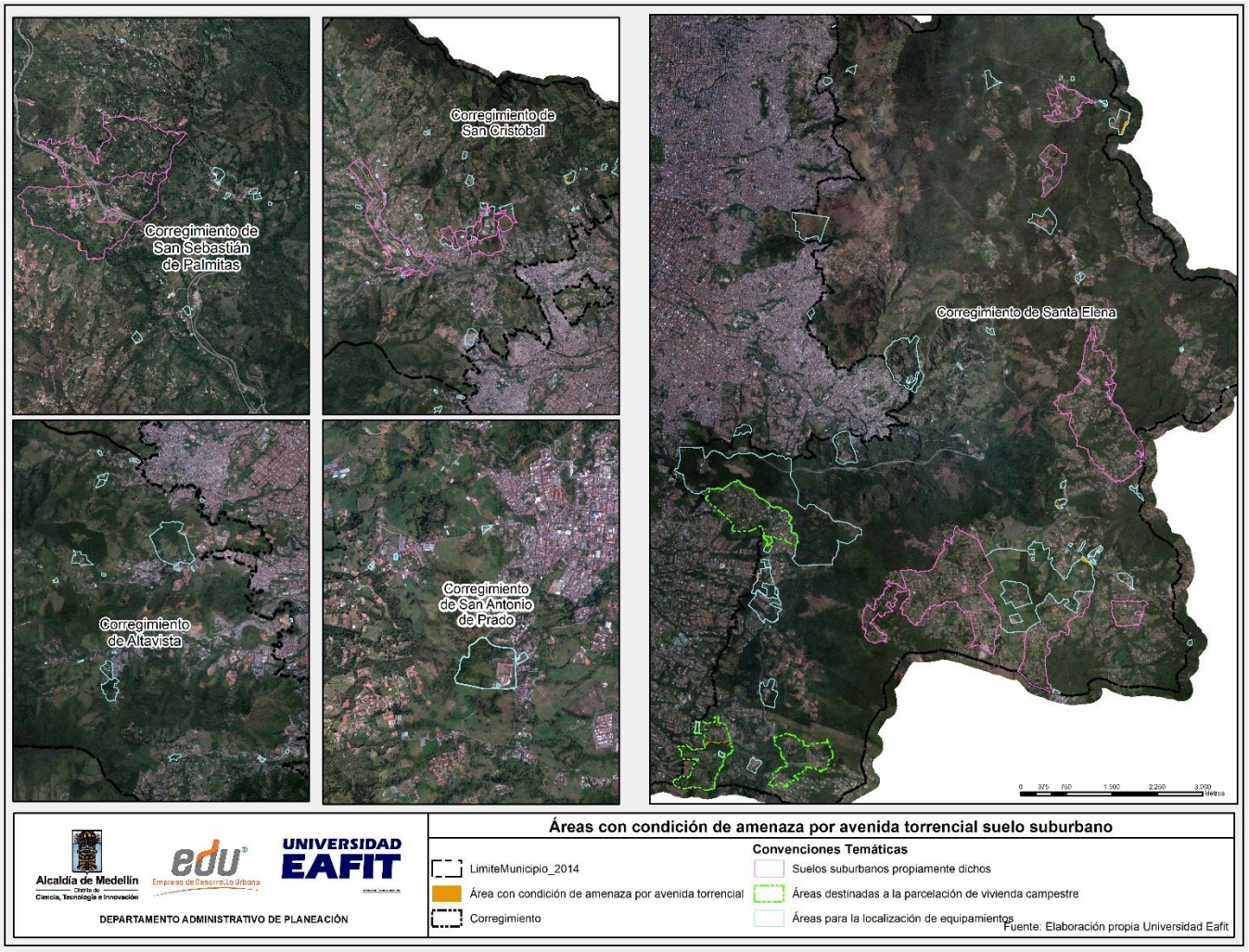


Ilustración 250. Áreas con condición de amenaza por avenidas torrenciales del suelo suburbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

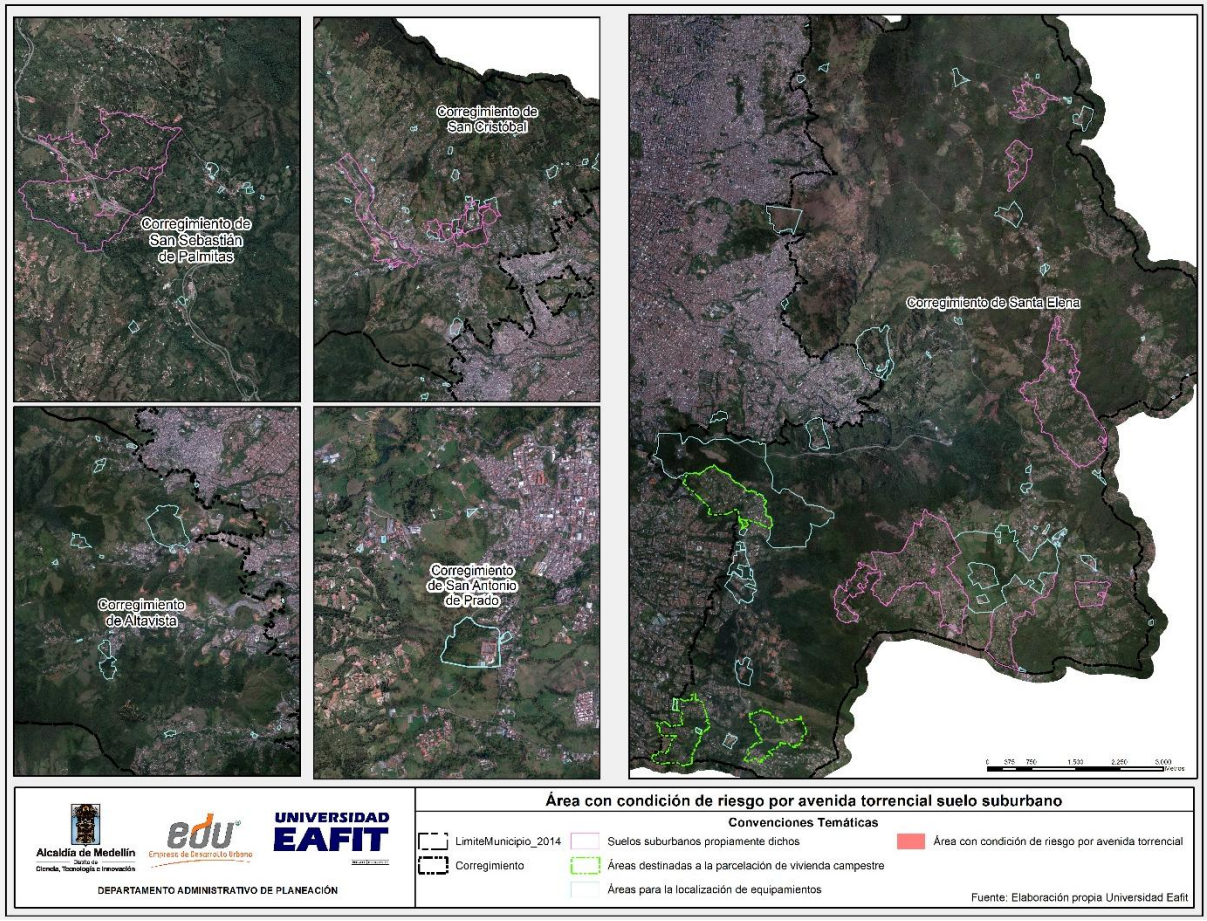


Ilustración 251. Áreas con condición de riesgo por avenidas torrenciales del suelo suburbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 82. Áreas con condición de amenaza y áreas con condición de riesgo por inundaciones y avenidas torrenciales del suelo suburbano del Distrito de Medellín

Suelo Suburbano	cuenca	Áreas con condición de amenaza - inundaciones Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo - inundaciones Área (ha)	Áreas con condición de amenaza – avenidas torrenciales Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo - avenidas torrenciales Área (ha)
Conexión Aburra Cauca	Q. La Iguana Q. La Potrera Q. Potreritos	5,81	0,09	1,52	0,24
Santa Elena, Sector Central	Q. Santa Elena	0,00	0,18	0,00	0,18
El Tesoro	Q. La Aguacatala	1,18	0,00	1,47	0,00

Suelo Suburbano	cuenca	Áreas con condición de amenaza - inundaciones Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo - inundaciones Área (ha)	Áreas con condición de amenaza – avenidas torrenciales Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo - avenidas torrenciales Área (ha)
	Q. La Paulita Q. Zuñiga				
San José de Manzanillo	Q. La Guayabala	0,03	0,00	0,03	0,00
Pedregal Alto	Q. El Hato - La Guayaba	0,22	0,02	0,26	0,00
Corazón El Morro	Q. Ana Diaz	0,09	0,00	0,00	0,00
Aldea	Q. La Sucia	0,44	0,00	0,54	0,00
La Loma	Q. La Leonarda	0,009	0,00	0,01	0,00

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

El suelo suburbano con áreas destinadas a la parcelación de vivienda campestre, áreas para la localización de equipamientos y suelos suburbanos propiamente dichos que presentan mayor área con condición de amenaza por inundación corresponde a los polígonos Conexión Aburrá Cauca y El Tesoro con áreas 5,81 ha y 1,18 ha respectivamente. Los demás polígonos presentan menos de 1 ha en esta condición (Ilustración 252).

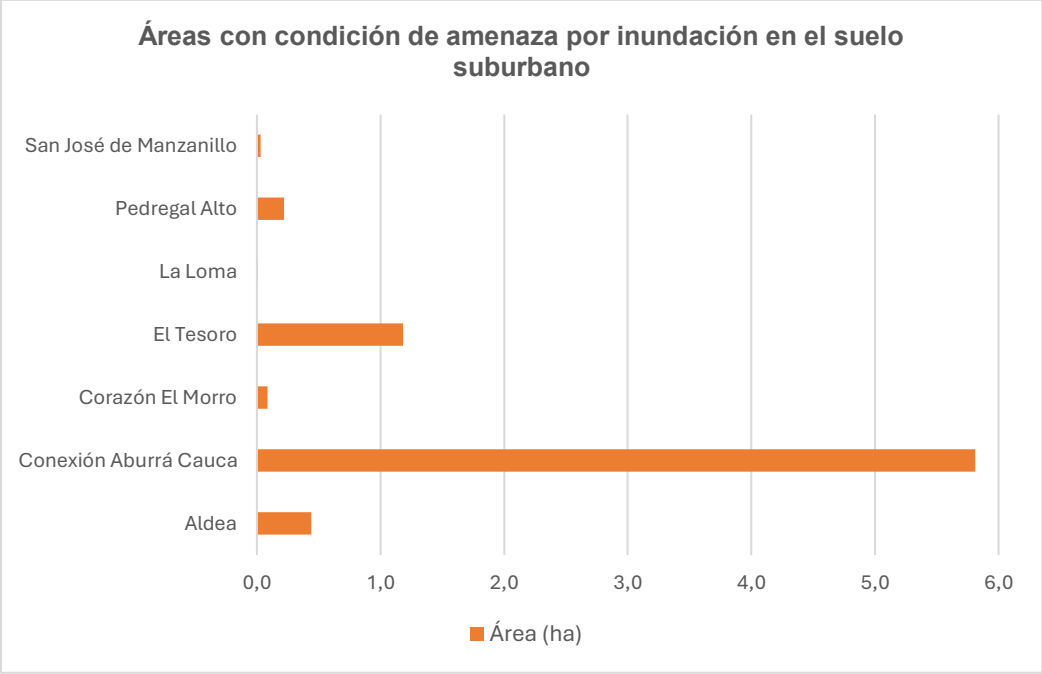


Ilustración 252. Áreas con condición de amenaza por inundaciones del suelo suburbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Los polígonos de Santa Elena Sector central y Conexión Aburrá Cauca son los que presentan mayor área con condición de riesgo por inundación, con 0,18 ha y 0,09 ha respectivamente.

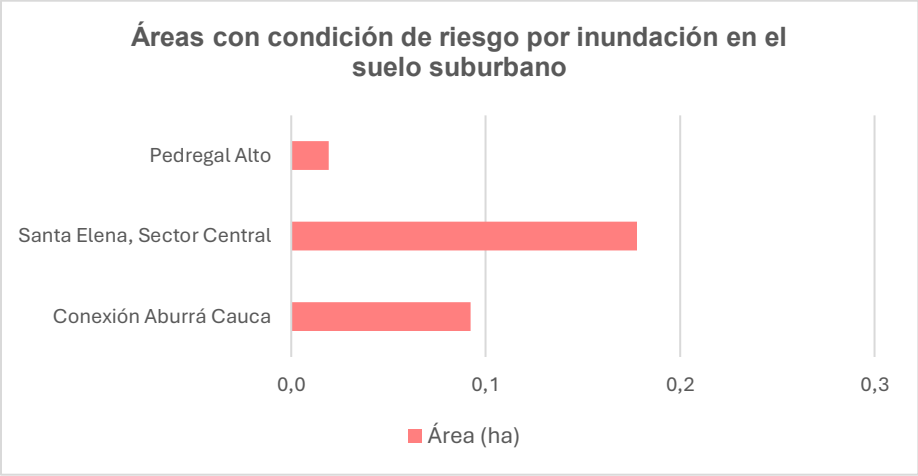


Ilustración 253. Áreas con condición de riesgo por inundaciones del suelo suburbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

El suelo suburbano con áreas destinadas a la parcelación de vivienda campestre, áreas para la localización de equipamientos y suelos suburbanos propiamente dichos que presentan mayor área con condición de amenaza por avenida torrencial corresponde a los polígonos Conexión Aburrá Cauca y El Tesoro con áreas 5,81 y 1,18 ha respectivamente. Los demás polígonos presentan menos de 1 ha en esta condición (Ilustración 254).

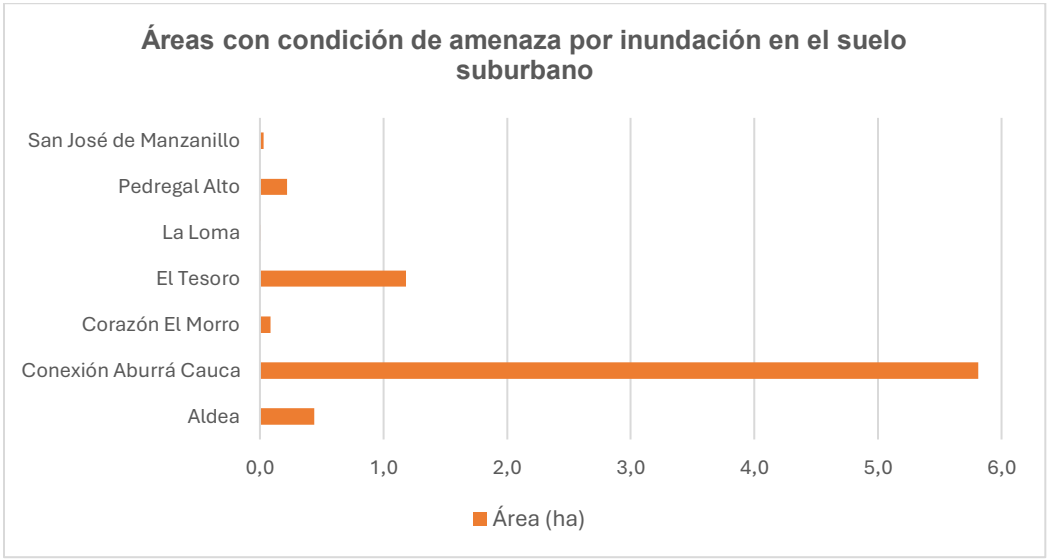


Ilustración 254. Áreas con condición de amenaza por avenidas torrenciales del suelo suburbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Los polígonos de Conexión Aburrá Cauca y Santa Elena Sector central presentan la mayor área con condición de riesgo por avenidas torrenciales con 0,24 ha y 0,18 ha respectivamente.

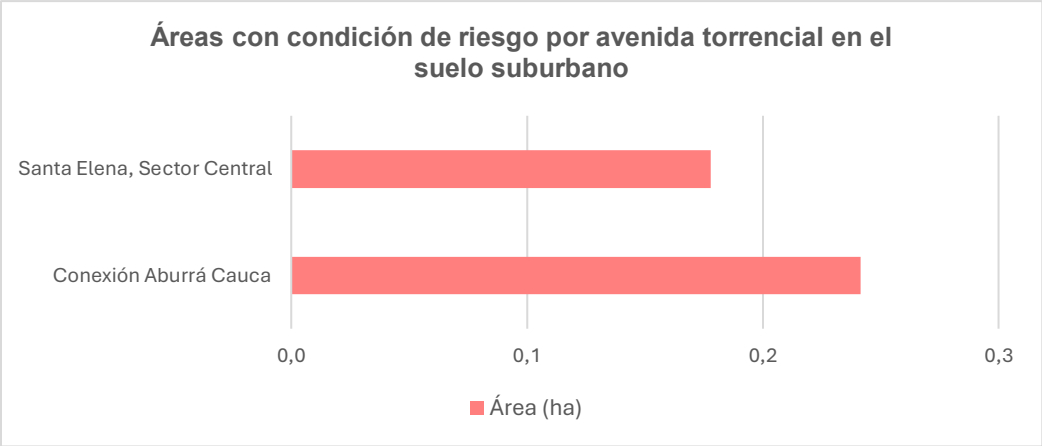


Ilustración 255. Áreas con condición de riesgo por avenidas torrenciales del suelo suburbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Otra de las categorías de desarrollo restringido del suelo suburbano corresponde con los centros poblados, Aguas Frías – San Pablo y La Palma corresponden con los centros poblados que mayores áreas presentan en condición de amenaza por inundación, por su parte, los centros poblados Santa Elena sector central, La Palma y Pajarito presentan mayores áreas en condición de amenaza por avenida torrencial.

En cuanto a las áreas con condición de riesgo el centro poblado Santa Elena, sector central presenta las mayores áreas tanto por inundación como avenida torrencial frente a los demás centros poblados.

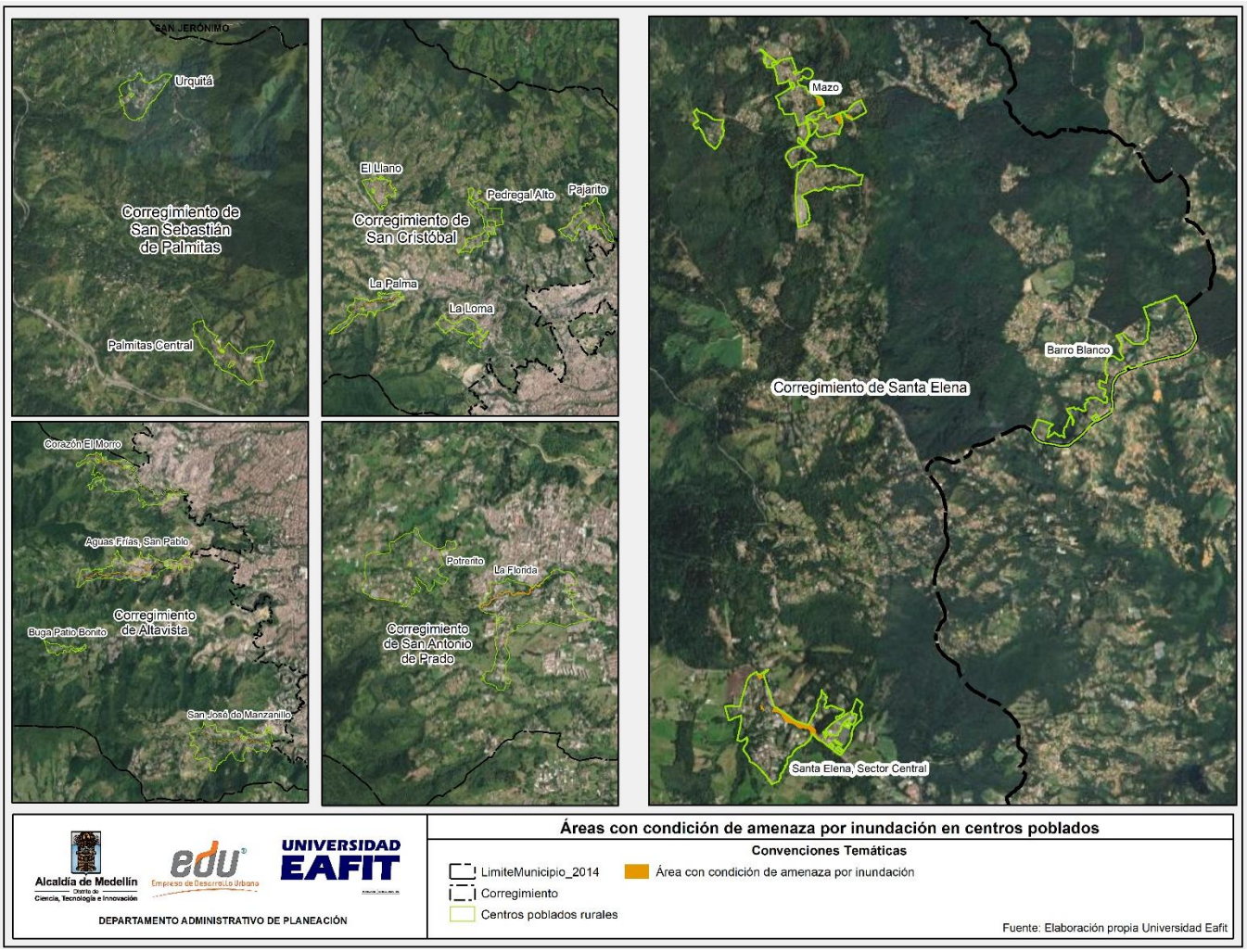


Ilustración 256. Áreas con condición de amenaza por inundación en centros poblados del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

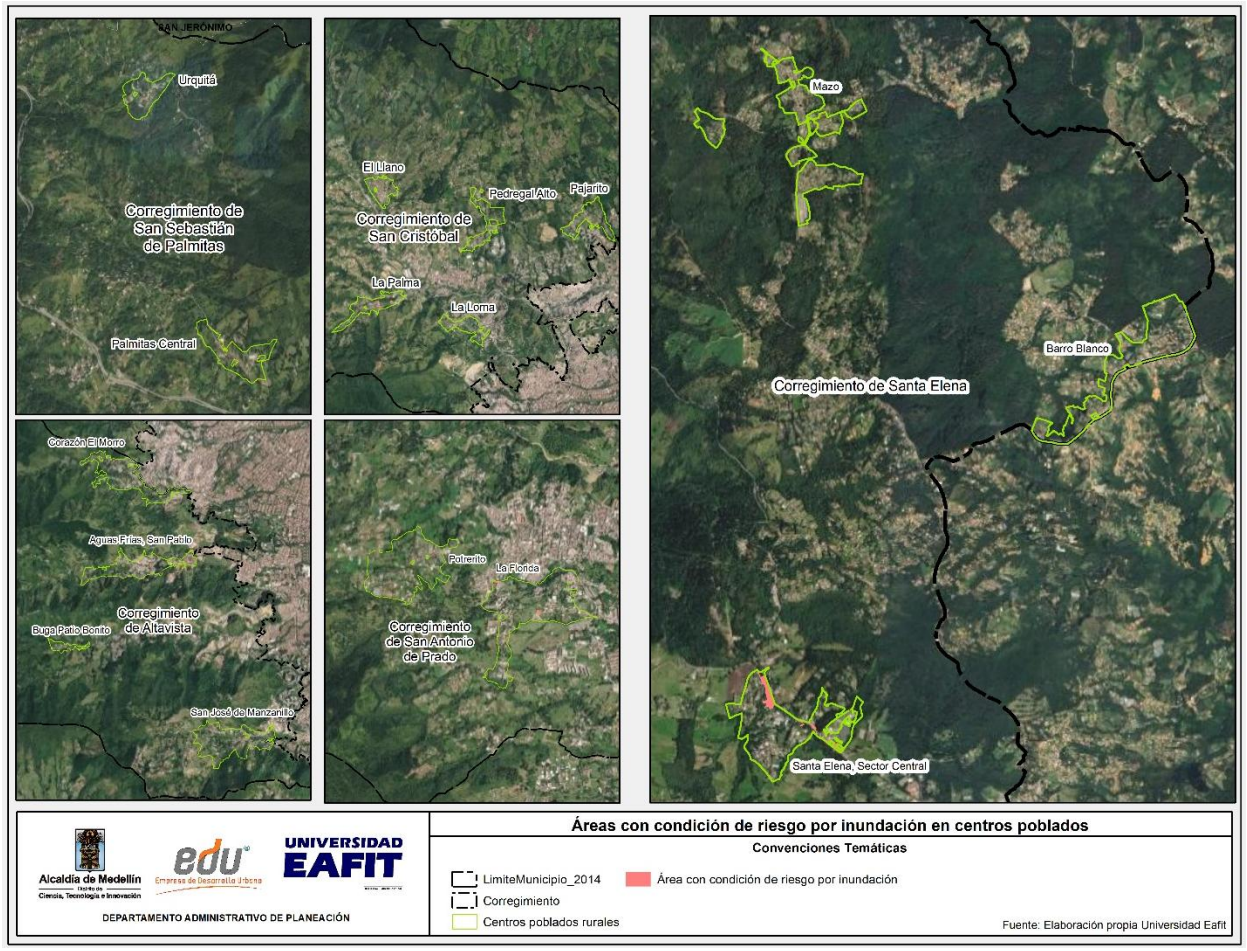


Ilustración 257. Áreas con condición de riesgo por inundaciones en los centros poblados del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

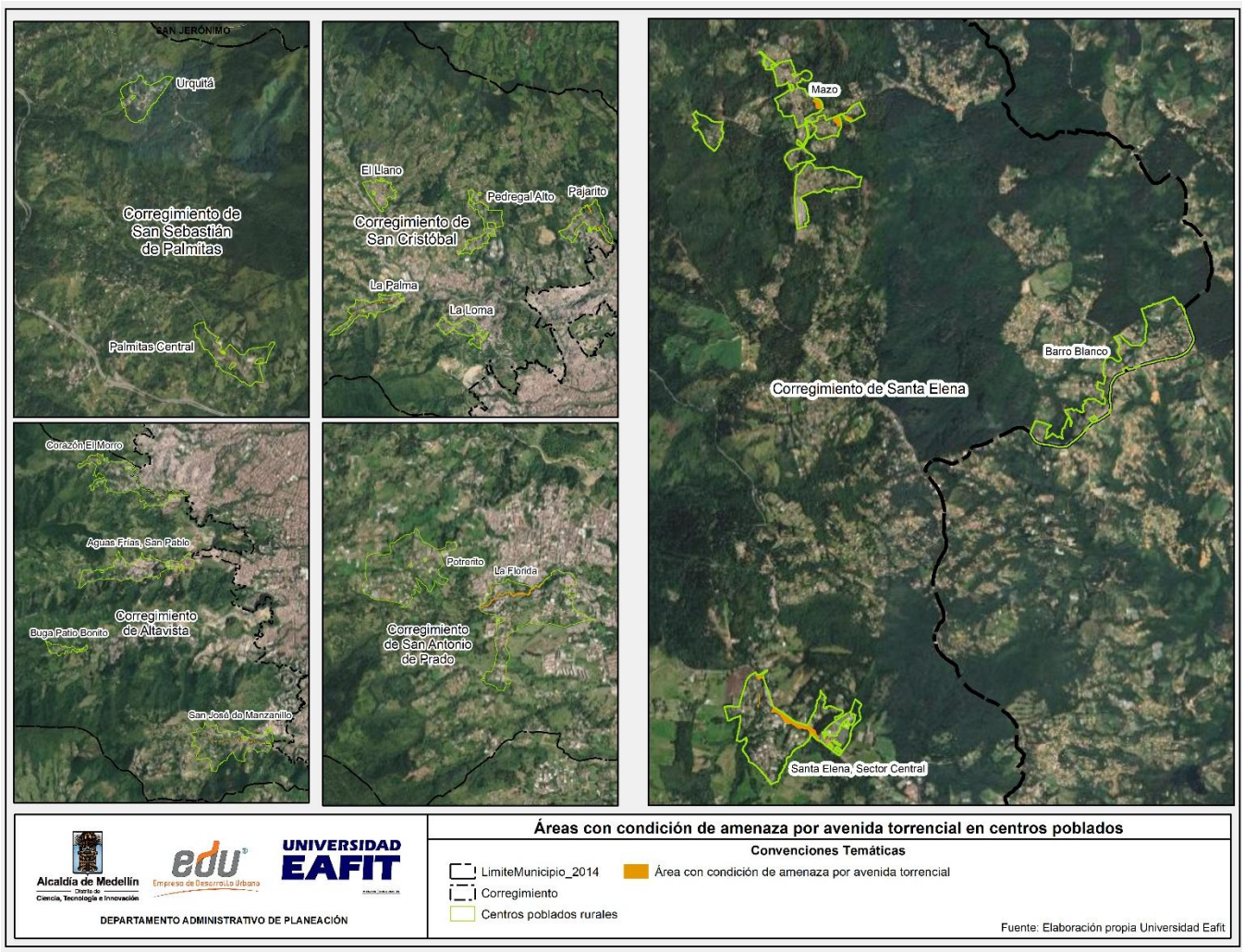


Ilustración 258. Áreas con condición de amenaza por avenidas torrenciales en centros poblados del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

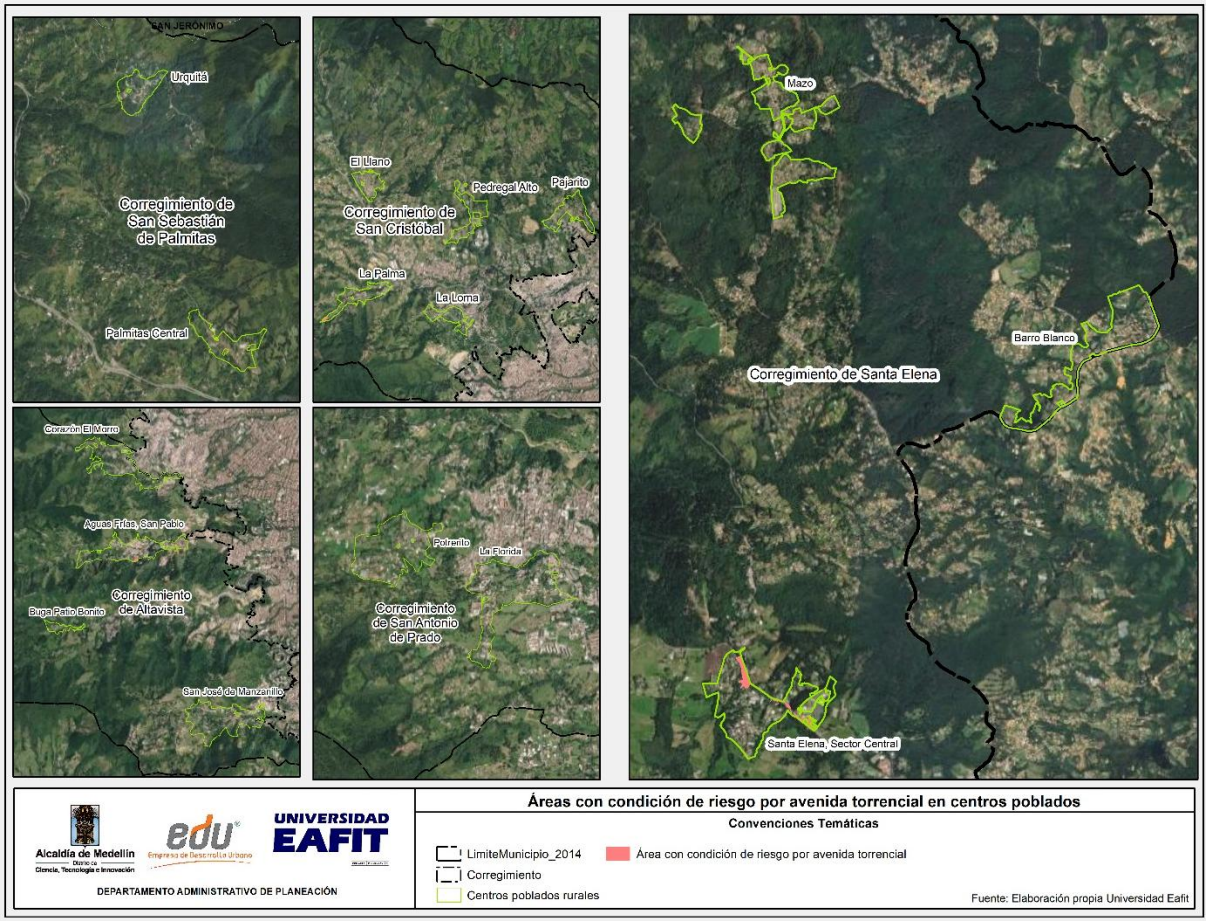


Ilustración 259. Áreas con condición de riesgo por avenidas torrenciales en centros poblados del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 83. Áreas con condición de amenaza y áreas con condición de riesgo por inundaciones y avenidas torrenciales en centros poblados del Distrito de Medellín

Corregimiento	Centro Poblado	Áreas con condición de amenaza - inundaciones Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo - inundaciones Área (ha)	Áreas con condición de amenaza – avenidas torrenciales Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo - avenidas torrenciales Área (ha)
Altavista	Corazón El Morro	1,90	0,15	0,41	0,00
	Aguas Frías, San Pablo	2,69	0,27	0,00	0,43
	San José del Manzanillo	1,56	0,00	1,74	0,00
	Buga Patio Bonito	0,00	0,11	0,00	0,00

Corregimiento	Centro Poblado	Áreas con condición de amenaza - inundaciones Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo - inundaciones Área (ha)	Áreas con condición de amenaza – avenidas torrenciales Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo - avenidas torrenciales Área (ha)
San Sebastián de Palmitas	Palmitas central	0,00	0,00	0,00	0,00
	Urquitá	0,00	0,00	0,00	0,08
San Antonio de Prado	Potrerito	0,00	0,00	0,00	0,00
	La Florida	0,84	0,19	1,00	0,03
San Cristóbal	La Palma	2,24	0,46	1,78	0,58
	El Llano	0,55	0,00	0,27	0,00
	Pedregal Alto	0,00	0,00	0,00	0,00
	Pajarito	0,98	0,01	1,66	0,19
	La Loma	0,35	0,00	0,40	0,01
Santa Elena	Santa Elena, sector central	1,74	1,92	1,97	2,03
	Barro Blanco	0,00	0,00	0,00	0,00
	Mazo, Los Vasquez	0,00	0,00	0,00	0,00
	Mazo	0,77	0,00	0,99	0,00

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

Aguas Frías – San Pablo y La Palma son los centros poblados que presentan las mayores áreas bajo condición de amenaza por inundación con 2,69 ha y 2,24 ha respectivamente, los demás centros poblados presentan áreas menores a 2 ha.

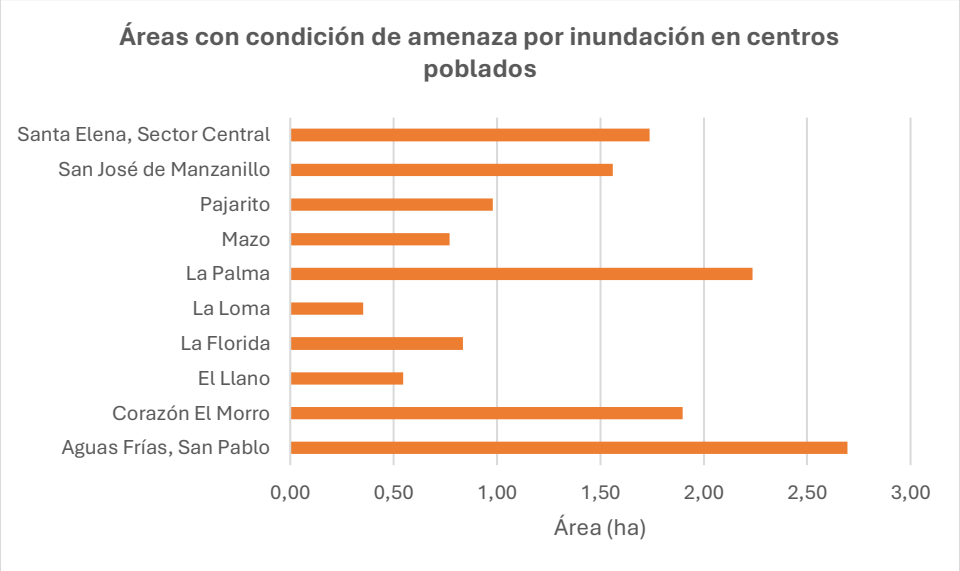


Ilustración 260. Áreas con condición de amenaza por inundaciones en los centros poblados del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

En cuanto a las áreas con condición de riesgo por inundación, el centro poblado de Santa Elena sector central presenta mayor área con 1,92 ha, los demás polígonos presentan áreas bajo está condición de menos de 1 ha.

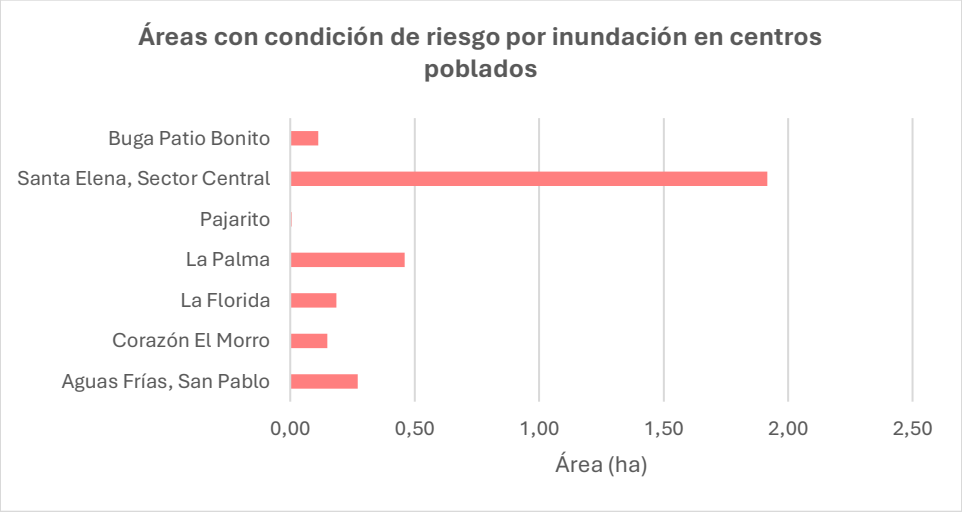


Ilustración 261. Áreas con condición de riesgo por inundaciones en los centros poblados del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Los centros poblados que presentan mayores áreas en condición de amenaza por avenida torrencial son Santa Elena sector central con 1,97 ha, seguido por La Palma con 1,78 ha, San José del Manzanillo con 1,74 ha, Pajarito con 1,66 ha y La Florida con 1 ha, los demás polígonos poseen menos de 1 ha bajo esta condición.

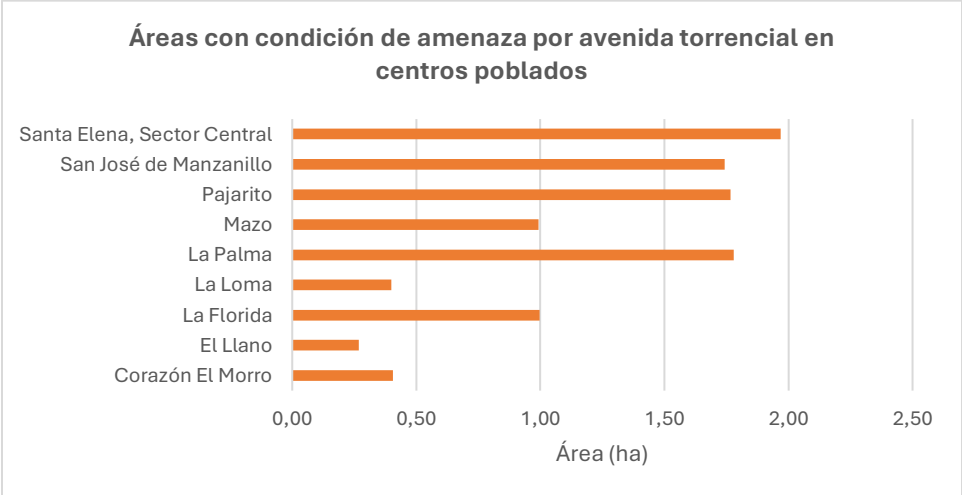


Ilustración 262. Áreas con condición de amenaza por avenidas torrenciales en los centros poblados del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Por su parte, el centro poblado de Santa Elena sector central presenta el área con mayor condición de riesgo por avenida torrencial con 2,03 ha, los demás centros poblados presentan menos de 1 ha bajo esta condición.

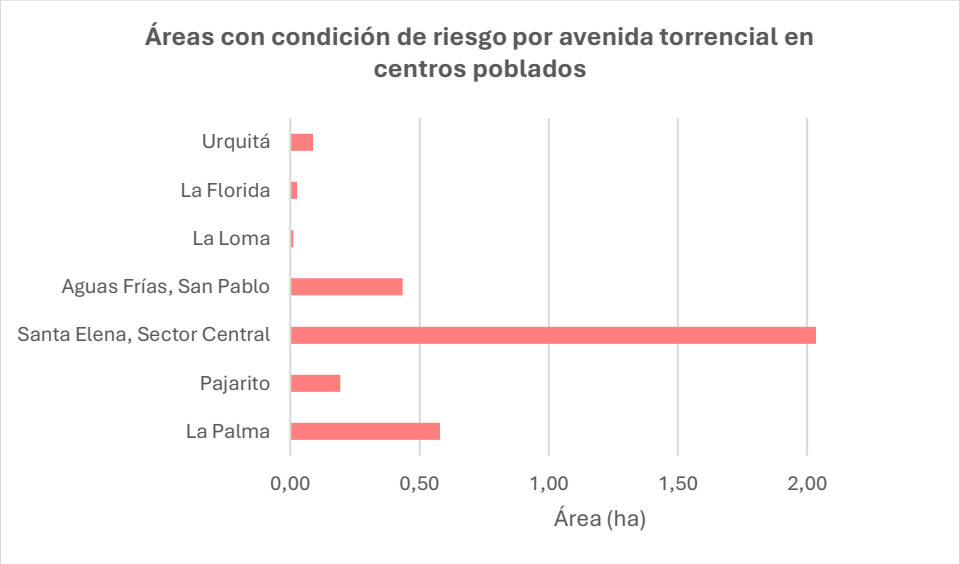


Ilustración 263. Áreas con condición de riesgo por avenidas torrenciales en los centros poblados del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

10.3 ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES DEL SUELO URBANO

La codificación de cada polígono (ACA) por inundaciones se realizó de acuerdo con: Prefijo IURA (urbano Amenaza) + Código comuna (xx) + Código barrio (xxxx) + Consecutivo del polígono por barrio (xx).

La codificación de cada polígono (ACR) por inundaciones se realizó de acuerdo con: Prefijo IURR (urbano Riesgo) + Código comuna (xx) + Código barrio (xxxx) + Consecutivo del polígono por barrio (xx).

La codificación de cada polígono (ACA) por avenidas torrenciales se realizó de acuerdo con: Prefijo TURA (urbano Amenaza) + Código comuna (xx) + Código barrio (xxxx) + Consecutivo del polígono por barrio (xx).

La codificación de cada polígono (ACR) por avenidas torrenciales se realizó de acuerdo con: Prefijo TURR (urbano Riesgo) + Código comuna (xx) + Código barrio (xxxx) + Consecutivo del polígono por barrio (xx).

En la Tabla 84 se presentan las áreas en cada una de las condiciones por polígono urbano (Ilustración 264 a Ilustración 267).

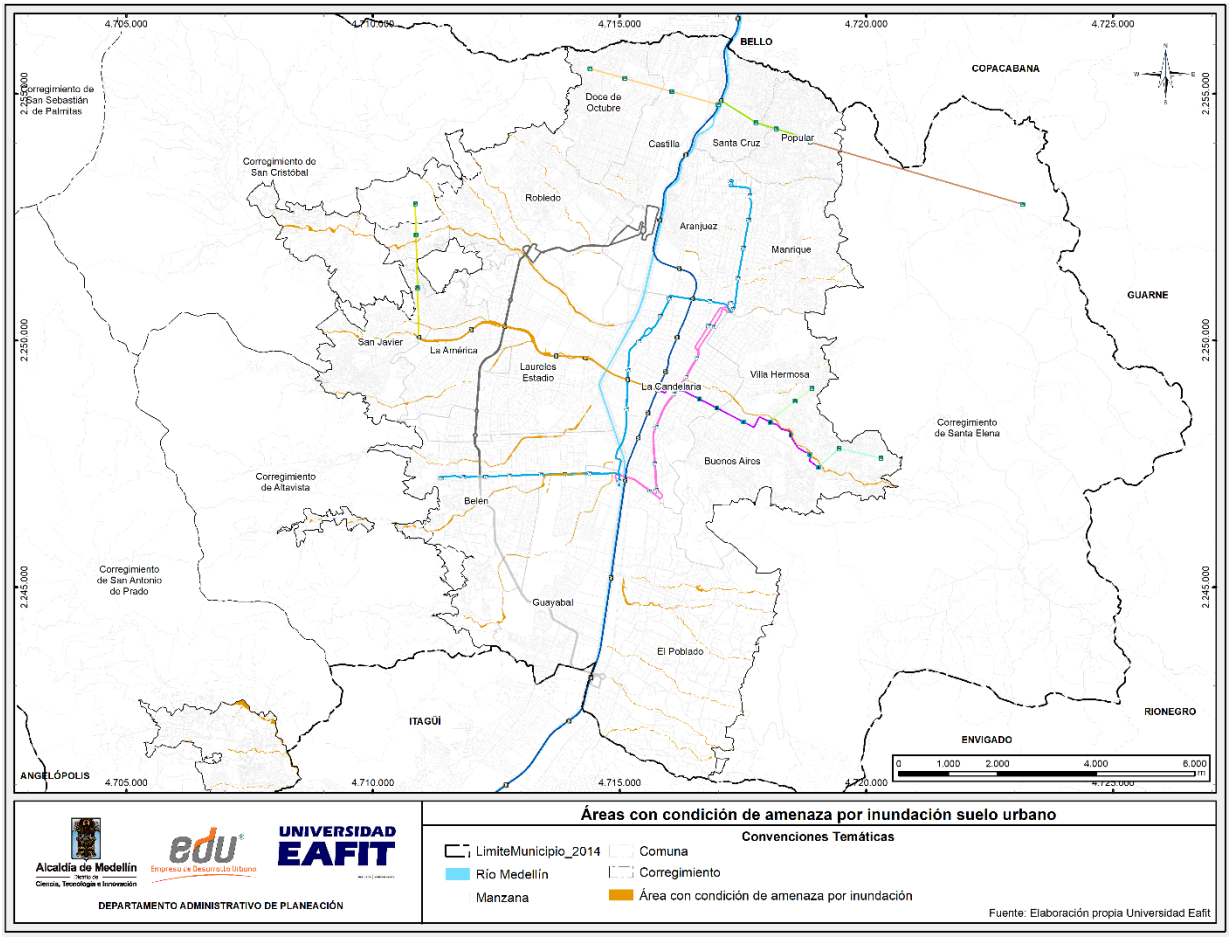


Ilustración 264. Áreas con condición de amenaza por inundaciones del suelo urbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

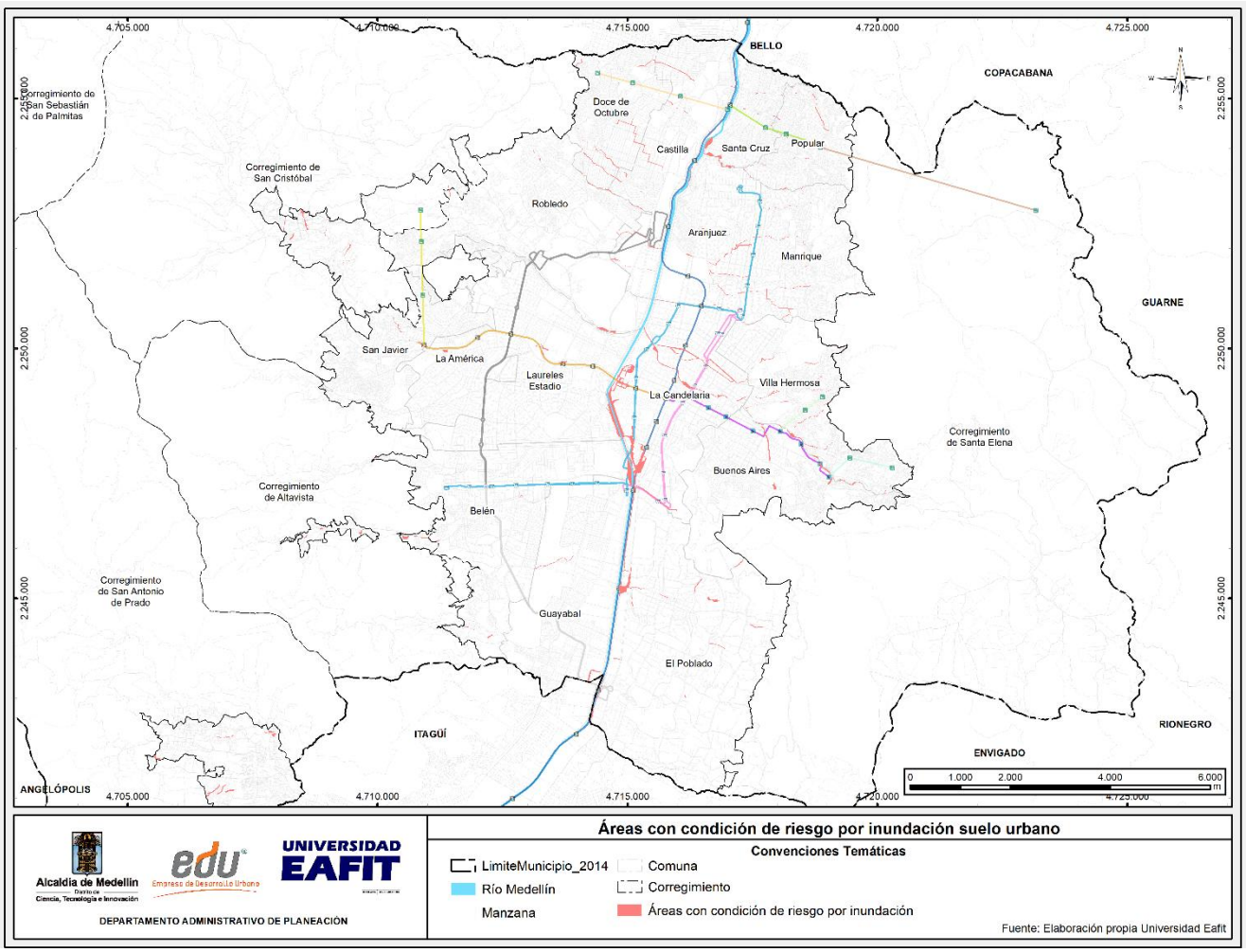


Ilustración 265. Áreas con condición de riesgo por inundaciones del suelo urbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

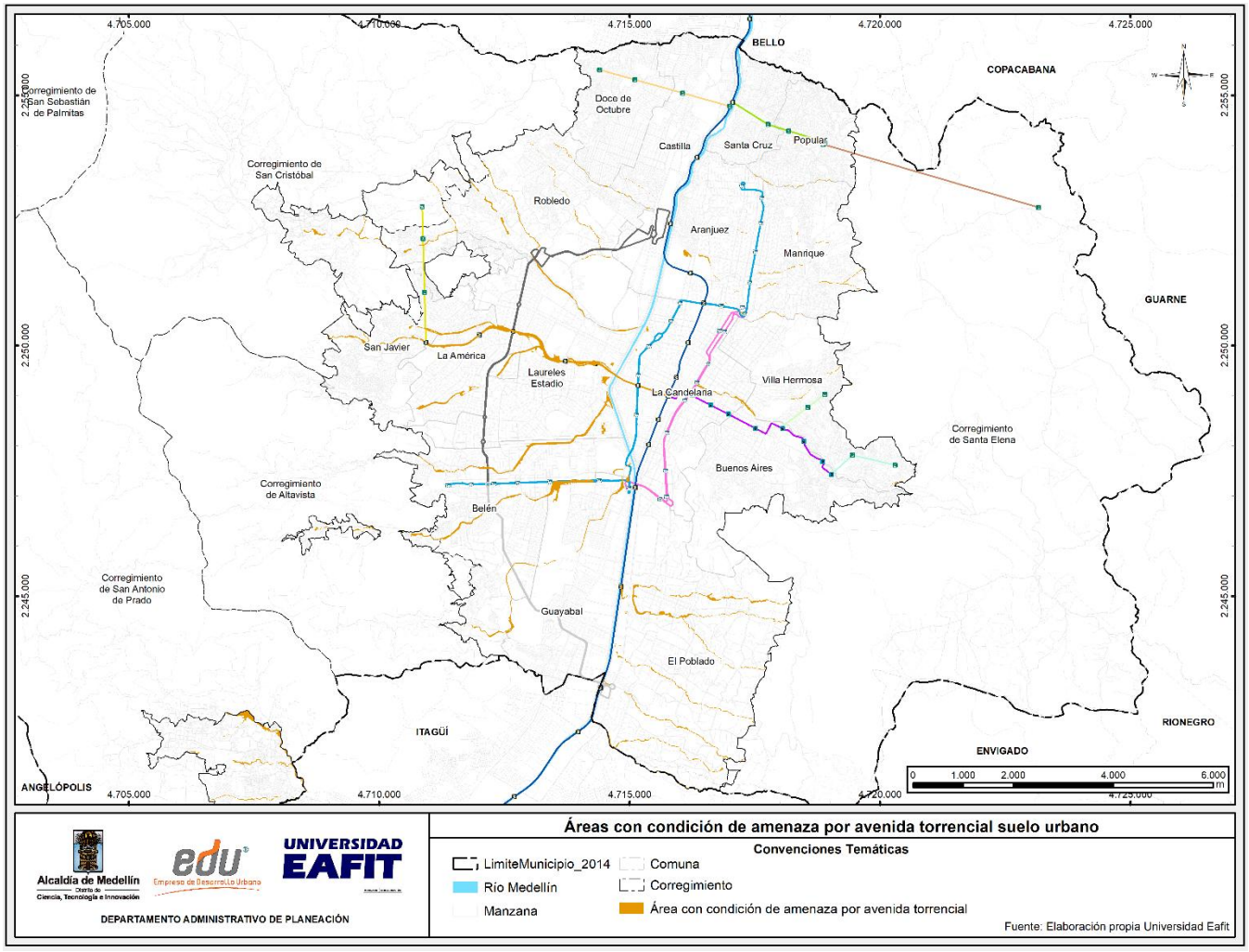


Ilustración 266. Áreas con condición de amenaza por avenidas torrenciales del suelo urbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

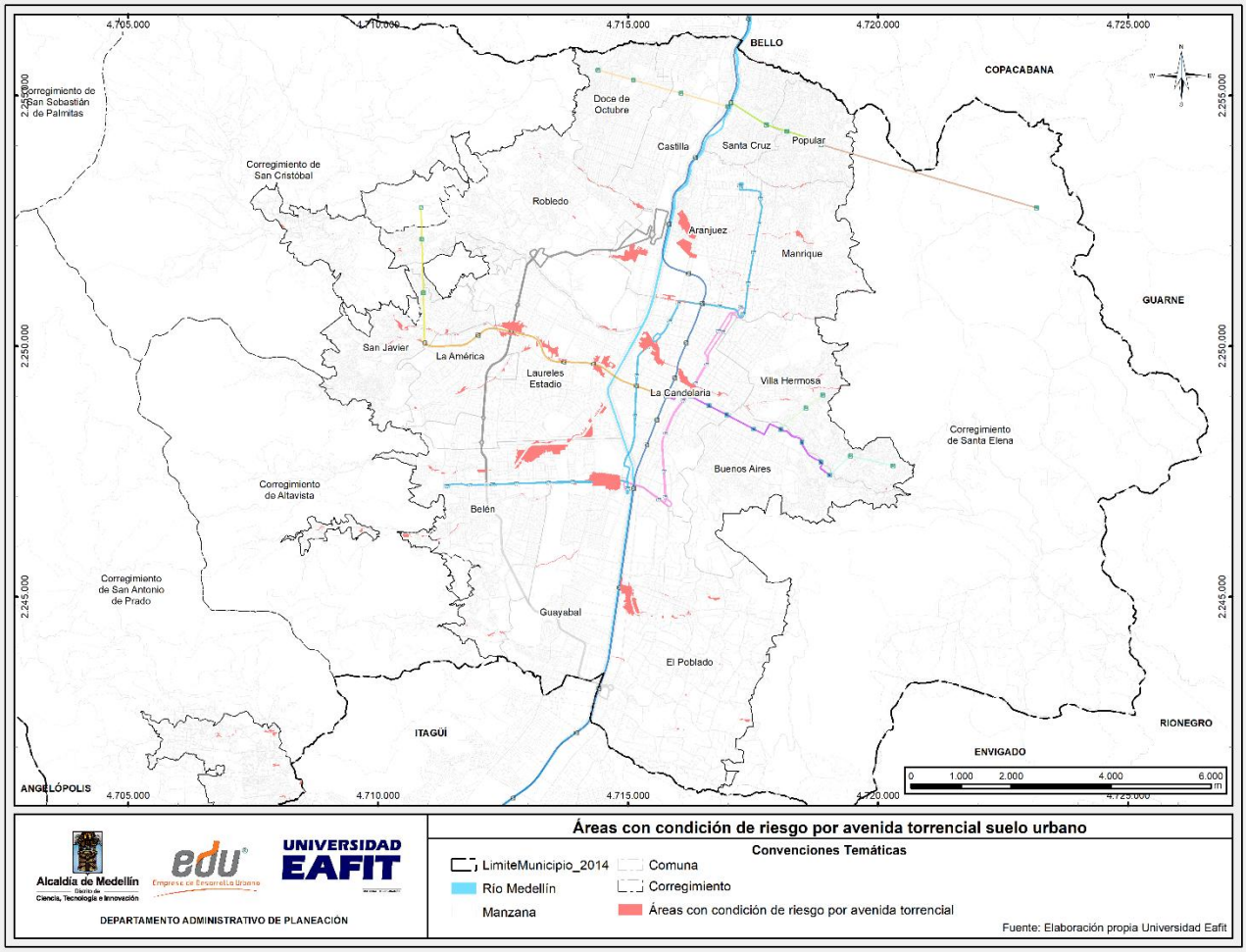


Ilustración 267. Áreas con condición de riesgo por avenidas torrenciales del suelo urbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 84. Áreas con condición de riesgo del suelo urbano del Distrito de Medellín

Comuna	Cuencas	Áreas con condición de amenaza - inundaciones Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo - inundaciones Área (ha)	Áreas con condición de amenaza – avenidas torrenciales Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo – avenidas torrenciales Área (ha)
Comuna 1-Popular	Q. Cañaveral - El Zancudo Q. La Seca Caño Popular Q. Granizal o La Herrera Q. La Rosa o Moscú Q. Carevieja o Villa Guadalupe Q. El Aguacatillo	0,85	1,70	1,06	0,39

Comuna	Cuencas	Áreas con condición de amenaza - inundaciones Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo - inundaciones Área (ha)	Áreas con condición de amenaza – avenidas torrenciales Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo – avenidas torrenciales Área (ha)
	Q. Blanquizala				
Comuna 2- Santa Cruz	Q. La Seca Caño Popular Q. El Mister Q. Blanquizala Q. Granizal o La Herrera Q. La Rosa o Moscú	0,16	4,19	0,29	0,4
Comuna 3 - Manrique	Q. Cañaveral - El Zancudo Q. La Bermejala Q. La Chorrera - El Molino Q. La Honda Q. La Hondita Q. La Bermejala 2 Q. La Mansión Q. La Raizala Q. Las Perras	3,14	3,15	3,83	3,8
Comuna 4 - Aranjuez	Q. La Bermejala Q. La Chorrera - El Molino Q. La Honda Q. La Rosa o Moscú Q. La Mansión Q. La Llorona	1,26	5,55	2,55	18,9
Comuna 5 - Castilla	Q. La Cantera Ramal Sur Q. Malpaso Q. La Feria Q. Tinajas Q. Minitas Q. La Cantera	1,17	4,94	1,36	11,0
Comuna 6 – 12 de Octubre	Q. La Madera Q. La Quintana Q. Los Lagos Q. La Quebradita Q. La Feria Q. Tinajas Q. Minitas Q. La Cantera Q. La Cantera Ramal Sur	0,35	4,81	0,50	0,64
Comuna 7 - Robledo	Q. La Iguana Q. La Moñonga Q. La Quintana Q. Malpaso Q. La Guagita Q. La Corcovada	18,04	2,32	14,50	3,35

Comuna	Cuencas	Áreas con condición de amenaza - inundaciones Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo - inundaciones Área (ha)	Áreas con condición de amenaza – avenidas torrenciales Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo – avenidas torrenciales Área (ha)
Comuna 8 – Villa Hermosa	Q. El Ahorcado Q. El Ñato Q. La Castro Q. la Rafita - Chorro Hondo Q. Santa Elena Q. La Loca Q. La Aguadita Q. El Chocho Q. La Arenera Q. La Gallinaza o Cañeria	3,98	5,84	2,18	2,1
Comuna 9 – Buenos Aires	Q. Santa Elena Q. Los Arados Q. La Pastora Q. La Pulgarina Q. La Cangreja Q. Yerbabuena	5,28	3,83	0,62	19,6
Comuna 10 – La Candelaria	Q. El Ahorcado Q. La Loca Q. Santa Elena Q. El Indio	1,34	31,86	2,97	22,6
Comuna 11 - Laureles	Q. Ana Diaz Q. La Hueso Q. La Picacha Q. Magdalena	13,00	4,32	26,23	7,2
Comuna 12 – La América	Q. Ana Diaz Q. La Hueso Q. La Pelahueso	7,74	0,63	13,80	3,4
Comuna 13 – San Javier	Q. La Hueso Q. La Iguana Q. La Pelahueso	8,26	0,79	7,96	15,8
Comuna 14 – El Poblado	Q. La Aguacatala Q. La Escopetería Q. La Paulita Q. La Poblada Q. La Presidenta Q. La Volcana Q. La Loma Q. Sanin o Moná Q. La Escopetería 2 Q. Yerbabuena	20,86	10,44	30,69	15,9
Comuna 15 - Guayabal	Q. Altavista Q. La Guayabala Q. Las Playas Q. Jabalcana	5,73	1,91	11,45	26,49

Comuna	Cuencas	Áreas con condición de amenaza - inundaciones Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo - inundaciones Área (ha)	Áreas con condición de amenaza – avenidas torrenciales Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo – avenidas torrenciales Área (ha)
Comuna 16 - Belén	Q. Altavista Q. La Guayabala Q. La Picacha Q. Caza Diana	16,26	4,17	24,75	0,39

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

La comuna 14 es la que presenta un área con condición de amenaza por inundación con mayor extensión con 20,86 ha, seguida de las comunas 7, 16, 11, 13 y 12 con áreas de 18,04 ha, 16,26 ha, 13,00 ha, 8,26 ha y 7,74 ha respectivamente. El restante de las comunas tiene áreas menores a 5,73 ha (Ilustración 268).

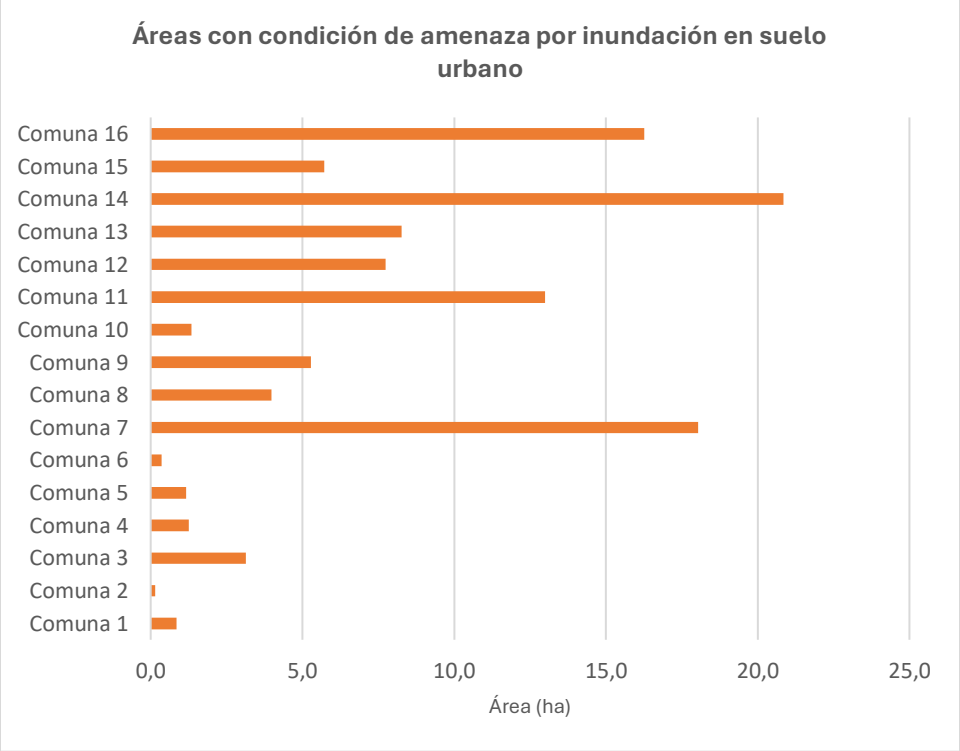


Ilustración 268. Áreas con condición de amenaza por inundaciones del suelo urbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

En relación con las áreas con condición de riesgo por inundaciones, las comunas 10 y 14 son las que presentan las mayores áreas en esta condición correspondientes a 31,86 ha y 10,44 ha respectivamente; seguido de las comunas 8, 4, 5, 6, 11, 2 y 16 con áreas de 5,84 ha, 5,55 ha, 4,94 ha,

4,81 ha, 4,32 ha, 4,19 ha y 4,17 ha, respectivamente. Las comunas restantes tienen áreas inferiores a 3,15 ha en esta condición (Ilustración 269).

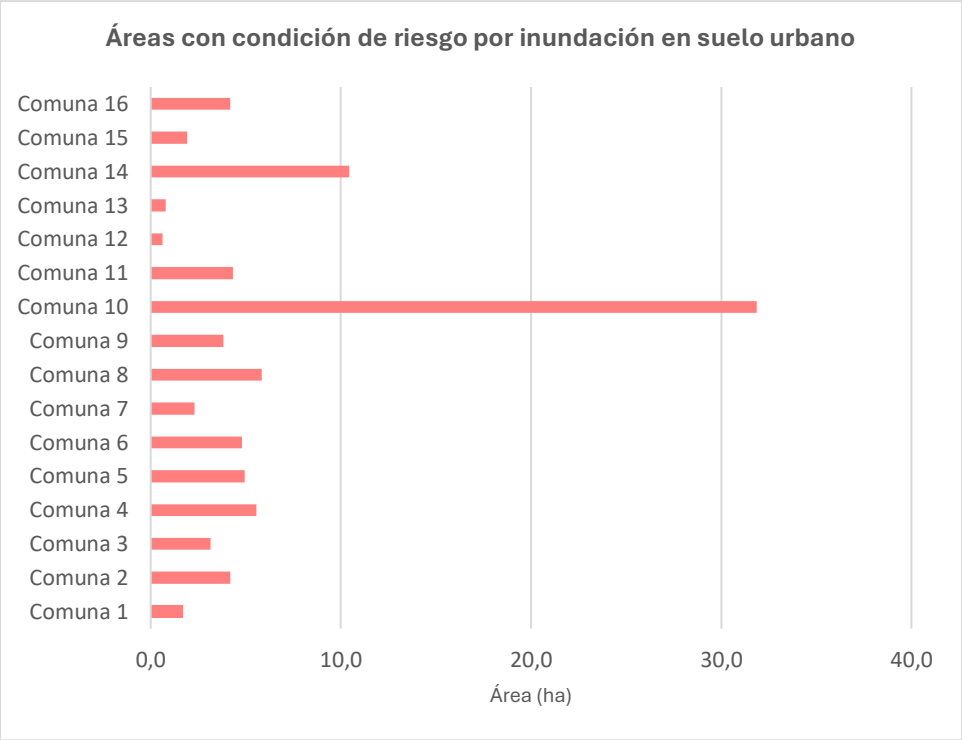


Ilustración 269. Áreas con condición de riesgo por inundaciones del suelo urbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

La comuna 14 es la que presenta un área con condición de amenaza por avenidas torrenciales con mayor extensión con 30,69 ha, seguida de las comunas 11, 16, 7,12 ,15 y 13 con áreas de 26,23 ha, 24,75 ha, 14,50 ha, 13,80 ha, 11,45 ha y 7,96 ha respectivamente. El restante de las comunas tiene áreas menores a 3,83 ha (Ilustración 270).

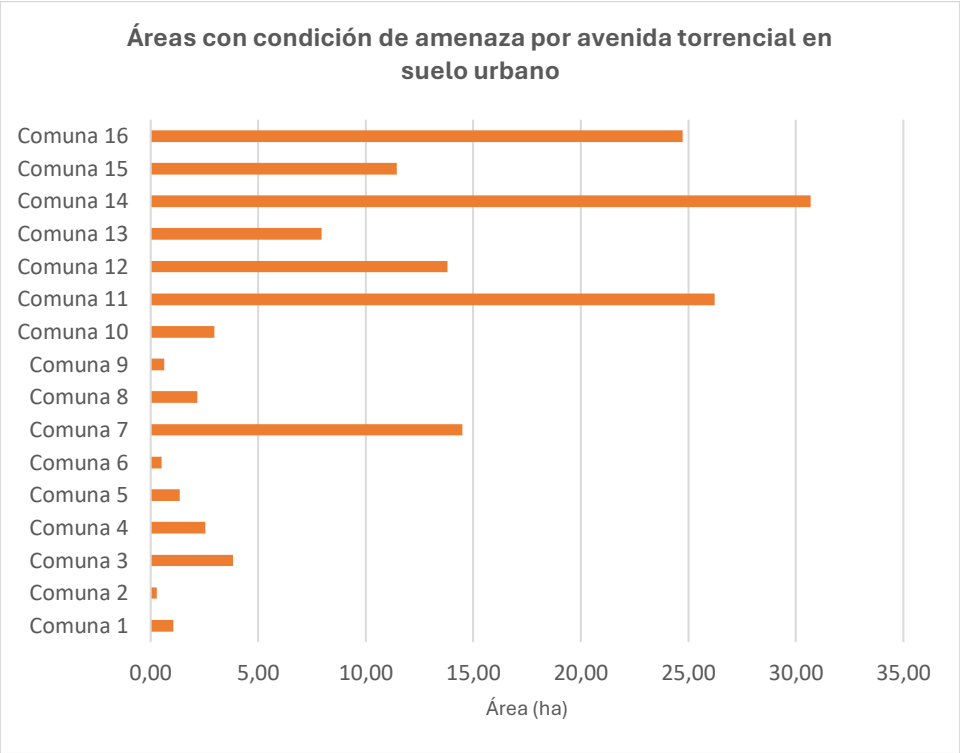


Ilustración 270. Áreas con condición de amenaza por avenidas torrenciales del suelo urbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

En relación con las áreas con condición de riesgo por avenida torrencial, las comunas 16, 11, 10, 4, 15 y 14 son las que presentan las mayores áreas en esta condición correspondientes a 26,49 ha, 22,6 ha, 19,6 ha, 18,9 ha, 15,9 ha y 15,8 ha respectivamente. Las comunas restantes tienen áreas inferiores a 10 ha en esta condición (Ilustración 271).

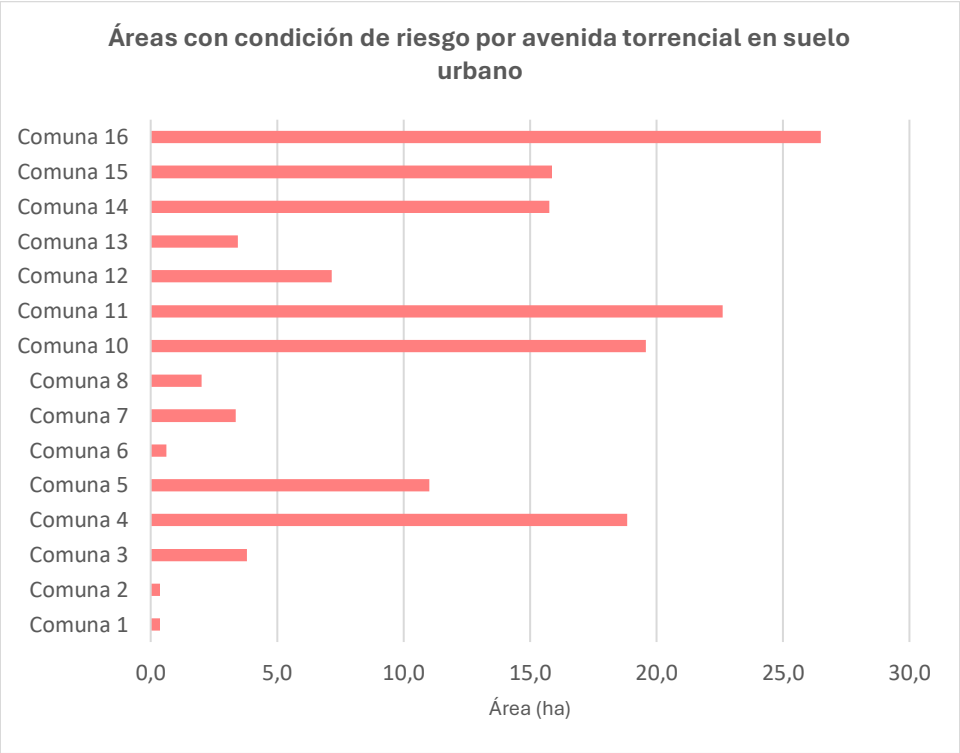


Ilustración 271. Áreas con condición de riesgo por avenidas torrenciales del suelo urbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

10.4 ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES DEL SUELO URBANO CORREGIMENTAL

En la Tabla 85 se presentan las áreas en cada una de las condiciones por polígono urbano corregimental (Ilustración 272 a Ilustración 275).

La codificación de cada polígono (ACA) por inundaciones se realizó de acuerdo con: Prefijo ICGA (Corregimiento Amenaza) + Código corregimiento (xx) + Código vereda o cabecera (xxxx) + Consecutivo del polígono por vereda o cabecera (xx).

La codificación de cada polígono (ACR) por inundaciones se realizó de acuerdo con: Prefijo ICGR (Corregimiento Riesgo) + Código corregimiento (xx) + Código vereda o cabecera (xxxx) + Consecutivo del polígono por vereda o cabecera (xx).

La codificación de cada polígono (ACA) por avenidas torrenciales se realizó de acuerdo con: Prefijo TCGA (Corregimiento Amenaza) + Código corregimiento (xx) + Código vereda o cabecera (xxxx) + Consecutivo del polígono por vereda o cabecera (xx).

La codificación de cada polígono (ACR) por avenidas torrenciales se realizó de acuerdo con: Prefijo TCGR (Corregimiento Riesgo) + Código corregimiento (xx) + Código vereda o cabecera (xxxx) + Consecutivo del polígono por vereda o cabecera (xx).

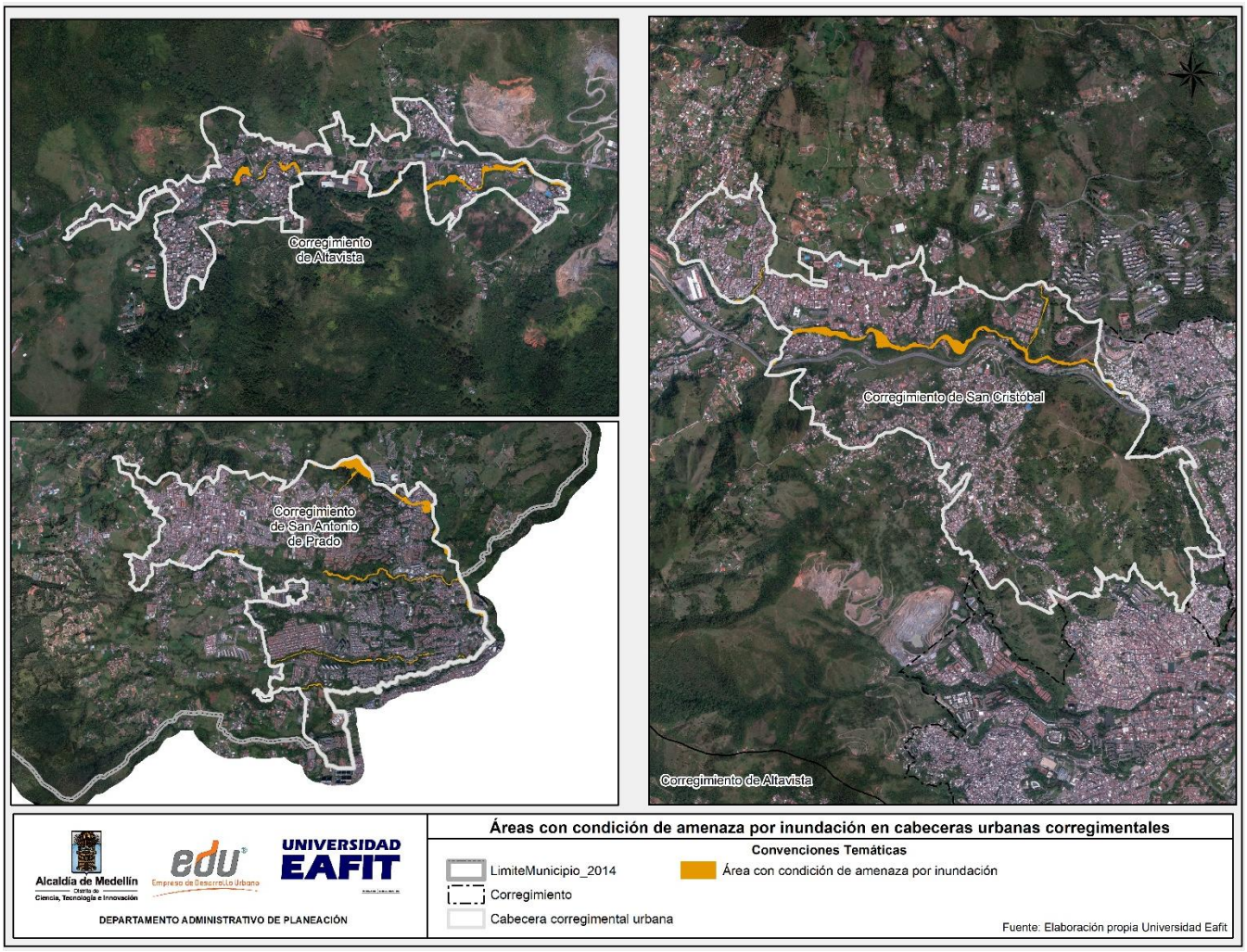


Ilustración 272. Áreas con condición de amenaza por inundaciones del suelo urbano de los corregimientos Altavista, San Cristóbal y San Antonio de Prado

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

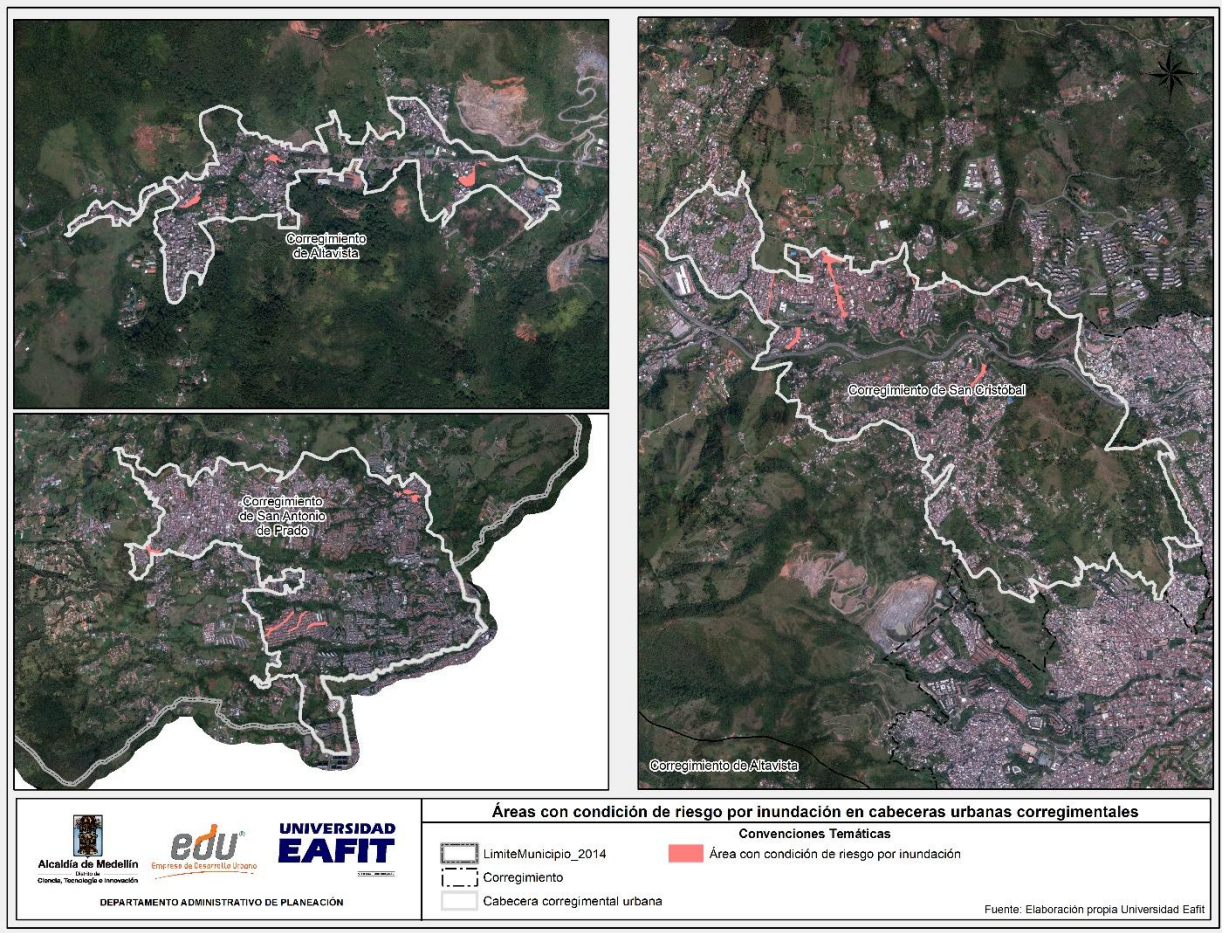


Ilustración 273. Áreas con condición de riesgo por inundaciones del suelo urbano de los corregimientos Altavista, San Cristóbal y San Antonio de Prado

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

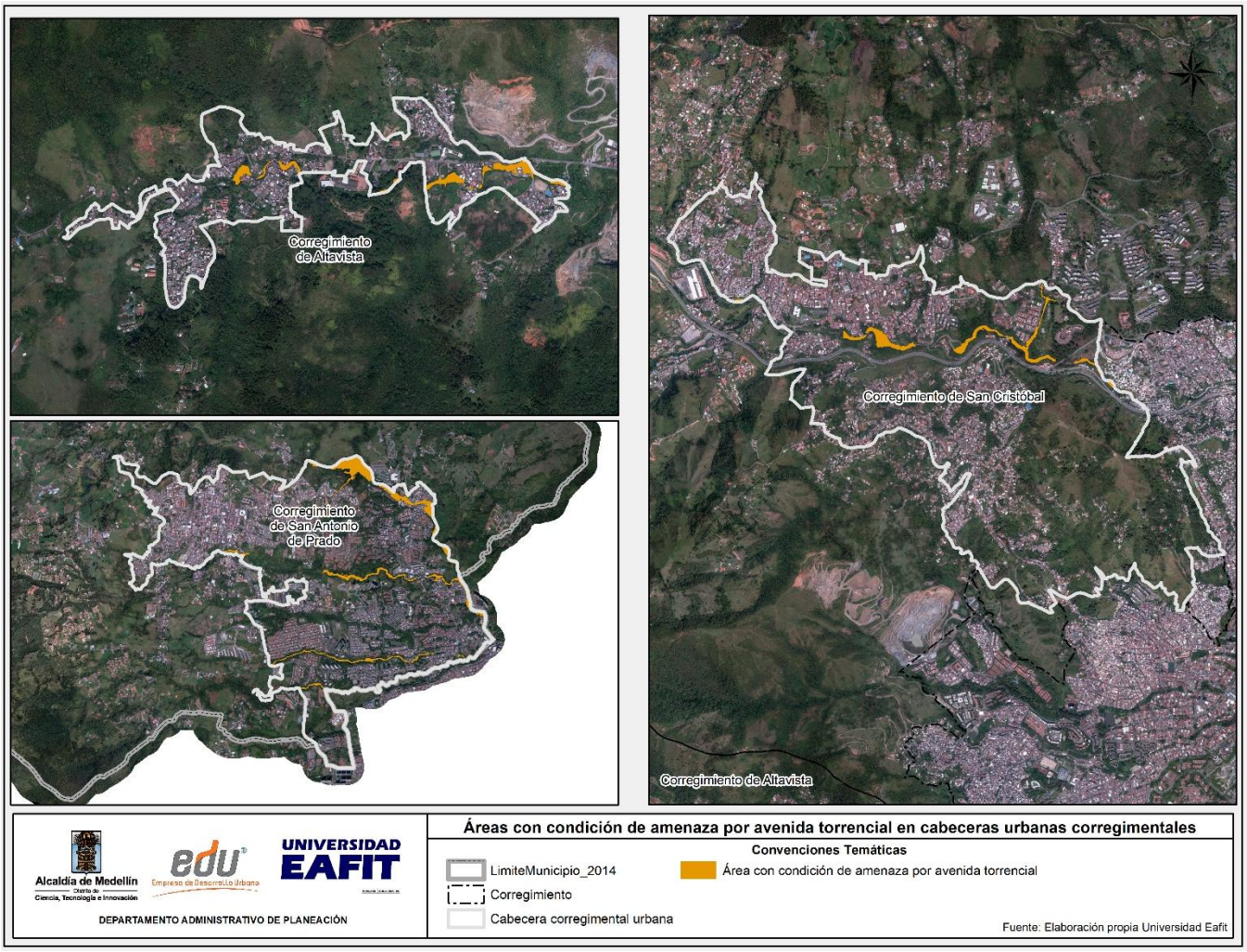


Ilustración 274. Áreas con condición de amenaza por avenidas torrenciales del suelo urbano de los corregimientos Altavista, San Cristóbal y San Antonio de Prado

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

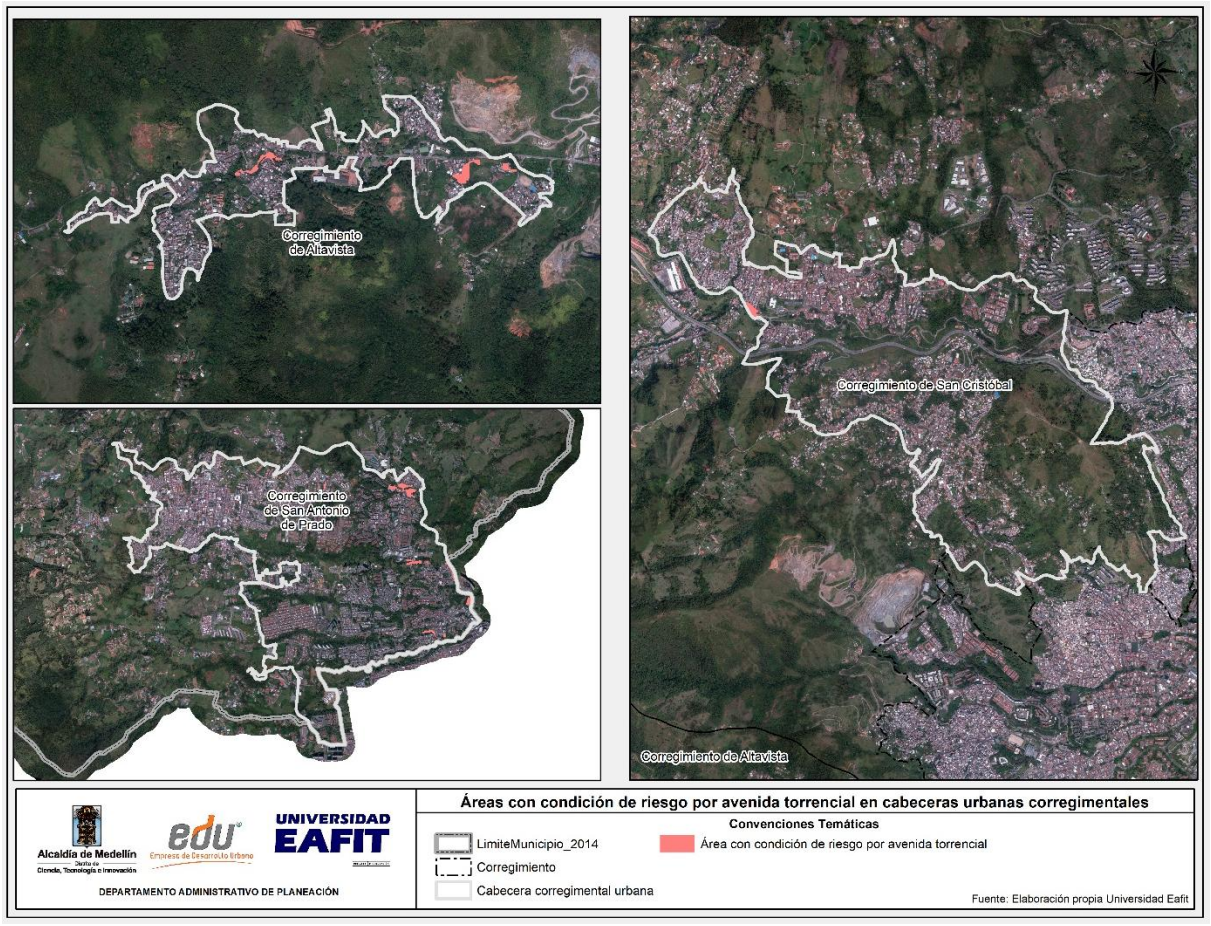


Ilustración 275. Áreas con condición de riesgo por avenidas torrenciales del suelo urbano de los corregimientos Altavista, San Cristóbal y San Antonio de Prado

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 85. Áreas con *condición de* amenaza y condición de riesgo del suelo urbano corregimental *del Distrito de Medellín*

Suelo urbano corregimental	Cuenca	Áreas con condición de amenaza - inundaciones Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo - inundaciones Área (ha)	Áreas con condición de amenaza – avenidas torrenciales Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo – avenidas torrenciales Área (ha)
Cabecera San Cristóbal (60)	Q. Aguas Frías Q. La Iguana Q. La Sapera Caño La Carmelita Caño A o Q. La Ronda Q. La Bermejala	8,28	2,95	5,95	0,45

Suelo urbano corregimental	Cuenca	Áreas con condición de amenaza - inundaciones Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo - inundaciones Área (ha)	Áreas con condición de amenaza – avenidas torrenciales Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo – avenidas torrenciales Área (ha)
	Q. La Roma				
Cabecera Altavista (70)	Q. Altavista	1,40	0,58	1,64	0,77
Cabecera San Antonio de Prado (80)	Q. Doña María Q. La Cañada Q. La Manguala Q. La Mauala Q. La Cabuyala	12,25	3,75	15,41	2,82

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

La cabecera del corregimiento de San Antonio de Prado es la que presenta la mayor área de su territorio en condición de amenaza por inundación con 12,25 ha, seguido de San Cristóbal con 8,28 ha y Altavista con 1,40 ha. En referencia a las áreas con condición de riesgo por inundación, también es San Antonio de Prado el que presenta la mayor área con 3,75 ha seguido de San Cristóbal con 2,95 ha y Altavista con 0,58 ha (*Ilustración 276* e *Ilustración 277*).

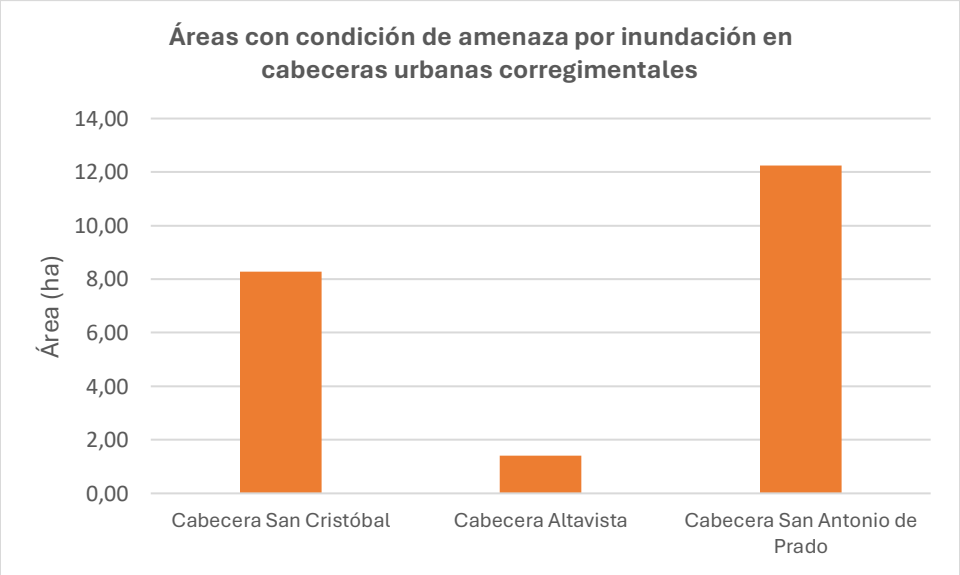


Ilustración 276. Áreas con condición de amenaza (ACA) por inundaciones de las cabeceras corregimentales del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

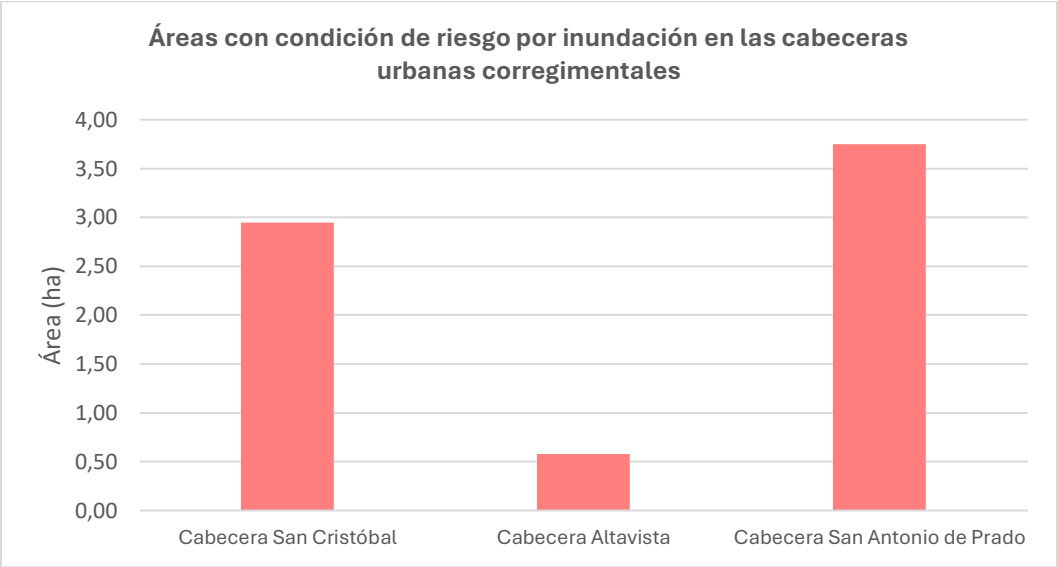


Ilustración 277. Áreas con condición de riesgo (ACR) por inundaciones de las cabeceras corregimentales del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Al igual que para las áreas con condición de amenaza por inundación, la cabecera del corregimiento de San Antonio de Prado es la que presenta la mayor área de su territorio en condición de amenaza por avenidas torrenciales con 15,41 ha, seguido de San Cristóbal con 5,95 ha y Altavista con 1,64 ha. En referencia a las áreas con condición de riesgo por avenida torrencial, el corregimiento de San Antonio de Prado tiene la mayor área con 2,82 ha seguido de San Cristóbal con 0,45 ha y Altavista con 0,77 ha (Ilustración 278 e Ilustración 279).

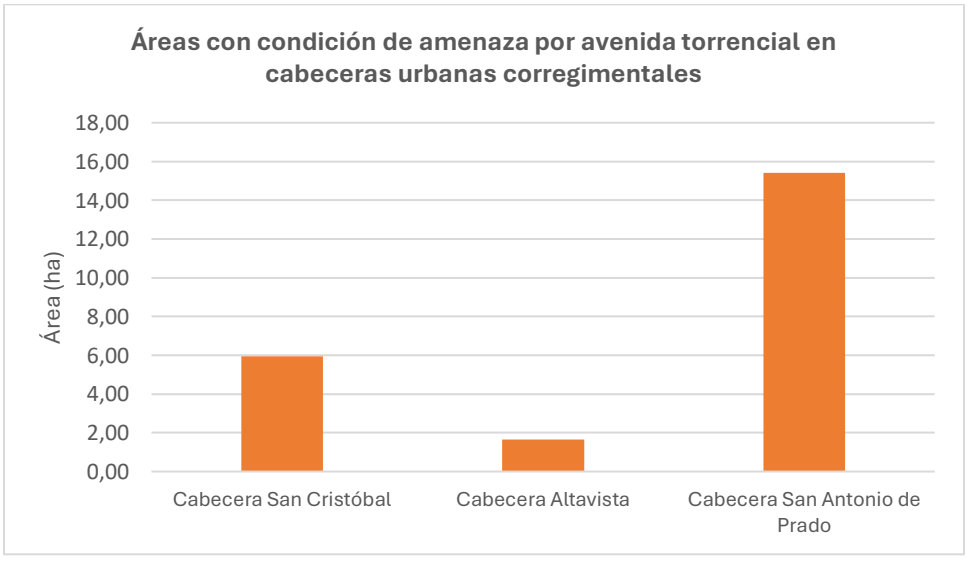


Ilustración 278. Áreas con condición de amenaza (ACA) por avenidas torrenciales de las cabeceras corregimentales del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

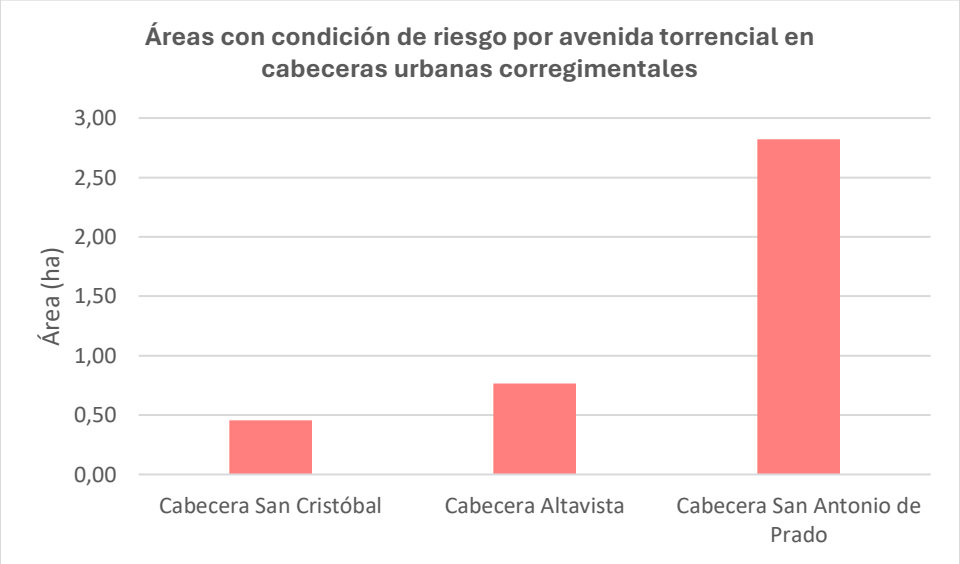


Ilustración 279. Áreas con condición de riesgo (ACR) por avenidas torrenciales de las cabeceras corregimentales del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

10.5 ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES DEL SUELO DE EXPANSIÓN

La codificación de cada polígono (ACA) por inundaciones se realizó de acuerdo con: Prefijo IEXA (Expansión Amenaza) + Código corregimiento o Comuna(xx) + Código vereda o barrio (xxxx) + Consecutivo del polígono por vereda o barrio (xx).

La codificación de cada polígono (ACR) por inundaciones se realizó de acuerdo con: Prefijo IEXR (Suburbano Riesgo) + Código corregimiento o Comuna (xx) + Código vereda o barrio (xxxx) + Consecutivo del polígono por vereda o barrio (xx).

La codificación de cada polígono (ACA) por avenidas torrenciales se realizó de acuerdo con: Prefijo TEXA (Expansión Amenaza) + Código corregimiento o Comuna(xx) + Código vereda o barrio (xxxx) + Consecutivo del polígono por vereda o barrio (xx).

La codificación de cada polígono (ACR) por avenidas torrenciales se realizó de acuerdo con: Prefijo TEXR (Suburbano Riesgo) + Código corregimiento o Comuna (xx) + Código vereda o barrio (xxxx) + Consecutivo del polígono por vereda o barrio (xx).

En la Tabla 86 se presentan las áreas con condición de amenaza en el suelo de expansión (Ilustración 280 e Ilustración 281).

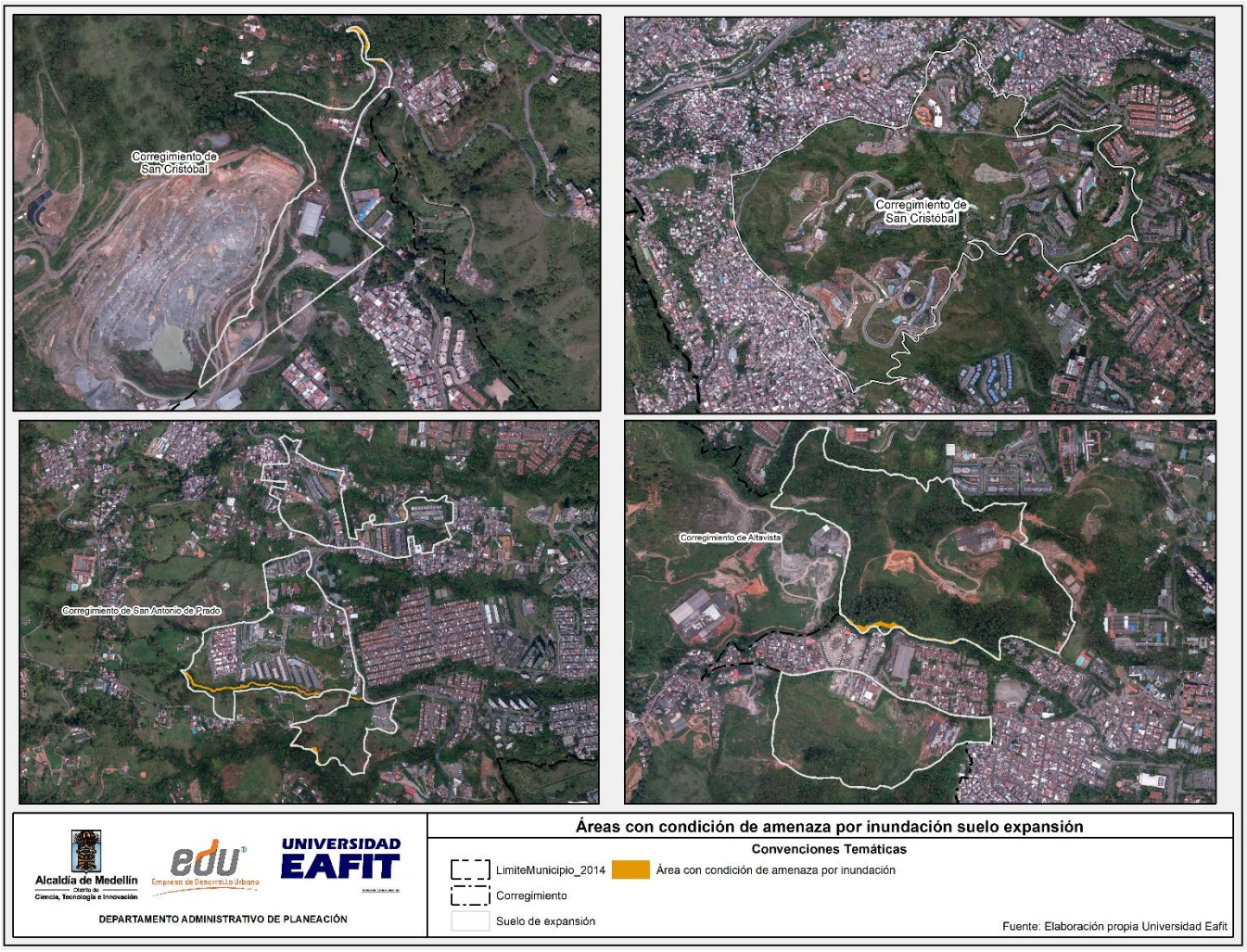


Ilustración 280. Áreas con condición de amenaza por inundaciones de los suelos de expansión del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

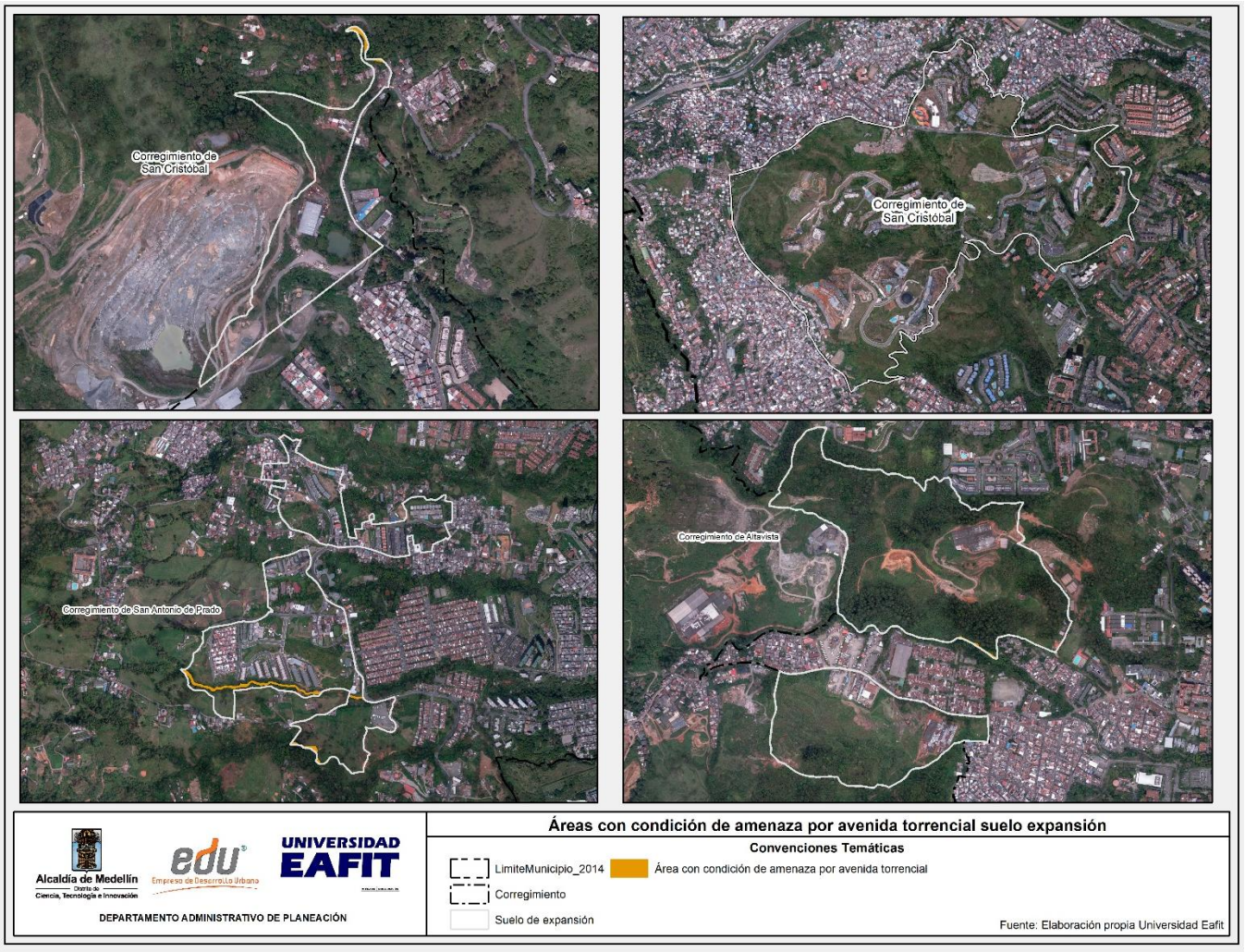


Ilustración 281. Áreas con condición de amenaza por avenidas torrenciales de los suelos de expansión del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

De los 9 polígonos de expansión, solo 3 presentan áreas en condición de amenaza por inundación, siendo La Florida el que mayor área tiene en esta condición con 0,54 ha, seguido por el polígono de El Noral que tiene la totalidad del área con condición de amenaza de 0,34 ha; y Eduardo Santos con 0,04 ha (Ilustración 282).

No se identificaron áreas con condición de riesgo por inundación en los suelos de expansión.

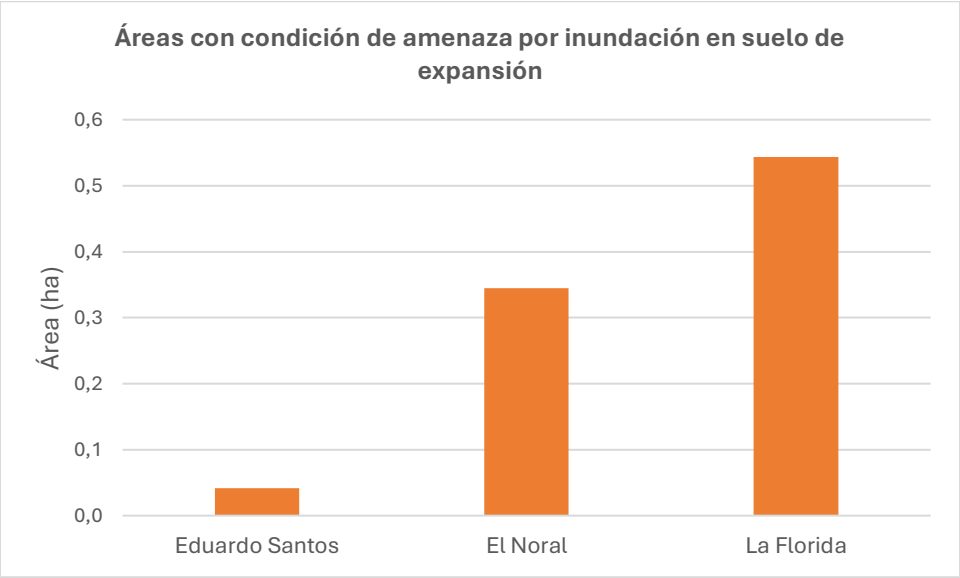


Ilustración 282. Áreas con condición de amenaza (ACA)) por inundaciones en los suelos de expansión del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

De los 9 polígonos de expansión, solo 3 presentan áreas en condición de amenaza por avenidas torrenciales, siendo La Florida el que mayor área tiene en esta condición con 0,65 ha, seguido por los polígonos de El Noral y Eduardo Santos que cada uno tiene un área con condición de amenaza de 0,06 y 0,04 ha (Ilustración 282).

No se identificaron áreas con condición de riesgo por avenidas torrenciales en los suelos de expansión.

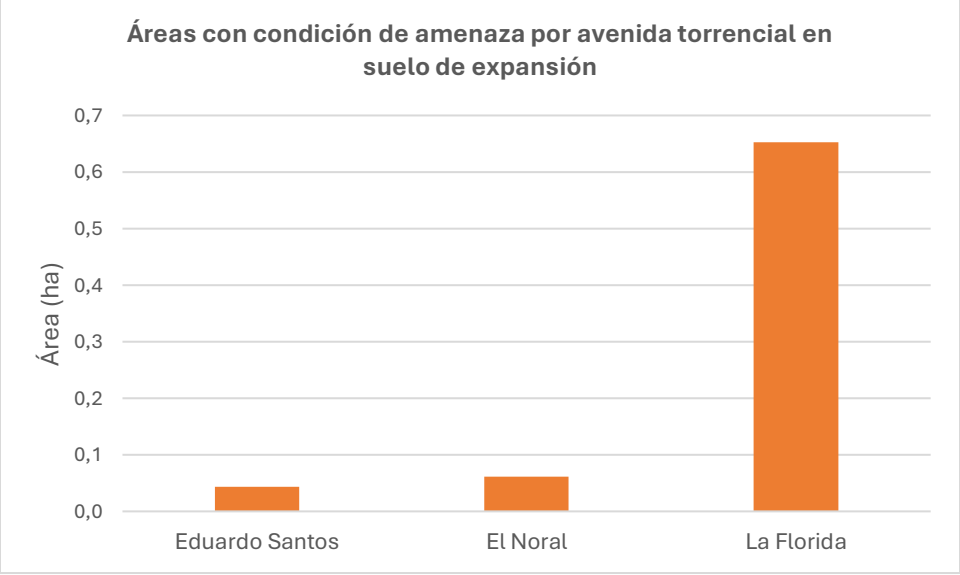


Ilustración 283. Áreas con condición de amenaza (ACA) por avenidas torrenciales en los suelos de expansión del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 86. Áreas con condición de amenaza y condición de riesgo por inundaciones y avenidas torrenciales de suelos de expansión del Distrito de Medellín

Suelo de expansión	Cuenca	Áreas con condición de amenaza - Inundación Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo - inundación Área (ha)	Áreas con condición de amenaza - Avenida torrencial Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo - Avenida torrencial Área (ha)
El Noral	Q. La Picacha	0,34	0,00	0,06	0,00
La Florida	Q. La Limona Q. La Manguala Q. La Mauala	0,54	0,00	0,65	0,00
Eduardo Santos	Q. La Leonarda	0,04	0,00	0,04	0,00

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

10.6 ÁREAS EN RIESGO – ESTUDIOS DE DETALLE

En esta clasificación se reportan las categorías de riesgo alto no mitigable, riesgo alto mitigable, riesgo medio y riesgo bajo de los estudios de detalle.

Los polígonos definidos en riesgo con base en los estudios de detalle elaborados bajo el Decreto 1077 de 2015 en el Distrito de Medellín cubren el 3,15% del área del Distrito

La codificación de cada polígono se realizó de acuerdo con: Prefijo ED (Estudio de Detalle) + Código POT (xxxx-xx).

En la Tabla 87 se presentan las áreas para cada categoría por comuna (Ilustración 284, Ilustración 285 Ilustración 286 e Ilustración 287).

Tabla 87. Áreas con categoría de riesgo de estudios de detalle del Distrito de Medellín

Comuna	Riesgo por inundación Área (ha)	Riesgo por avenidas torrenciales Área (ha)
Comuna 1	0,42	0,00
Comuna 2	0,00	0,00
Comuna 3	0,34	0,00
Comuna 4	0,00	0,00
Comuna 6	0,16	0,37
Comuna 7	0,79	6,45
Comuna 8	0,34	20,18
Comuna 9	0,32	20,03
Comuna 10	1,34	0,00
Comuna 13	0,00	8,96

Comuna	Riesgo por inundación Área (ha)	Riesgo por avenidas torrenciales Área (ha)
Comuna 14	1,24	0,00
Comuna 16	0,00	6,99
Corregimiento 50	0,00	0,00
Corregimiento 60	0,13	2,83
Corregimiento 70	2,41	8,19
Corregimiento 80	1,10	0,00
Corregimiento 90	2,42	2,40
Área de expansión	2,19	0,54
Área Suburbana	0,12	22,25
SN (Corresponde a polígonos que se encuentras dispersos en el área del Distrito y no tienen asignación de clasificación del suelo desde el POT).	-	0,01

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

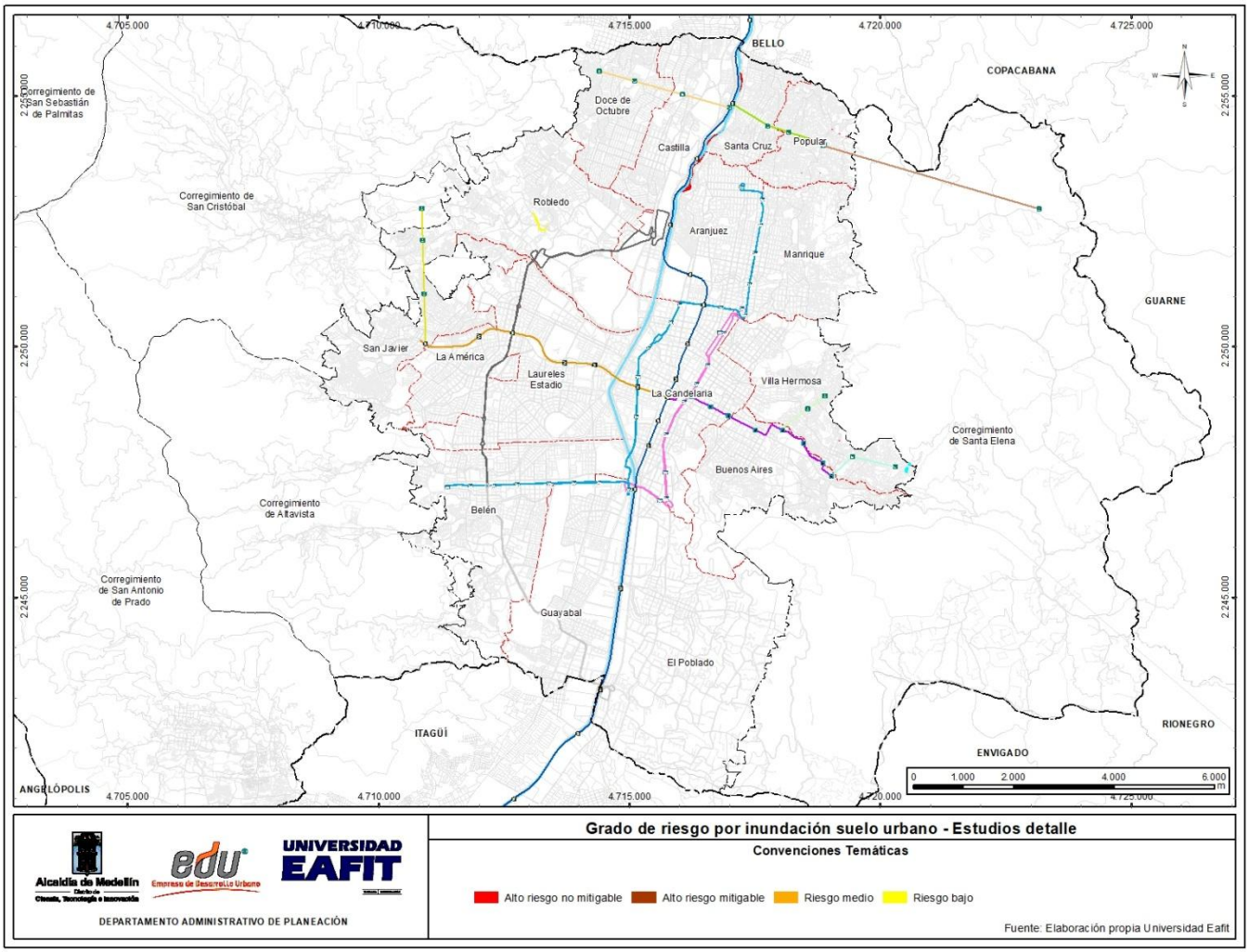


Ilustración 284. Áreas en la categoría de riesgo por inundación en estudios de detalle en el suelo urbano

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

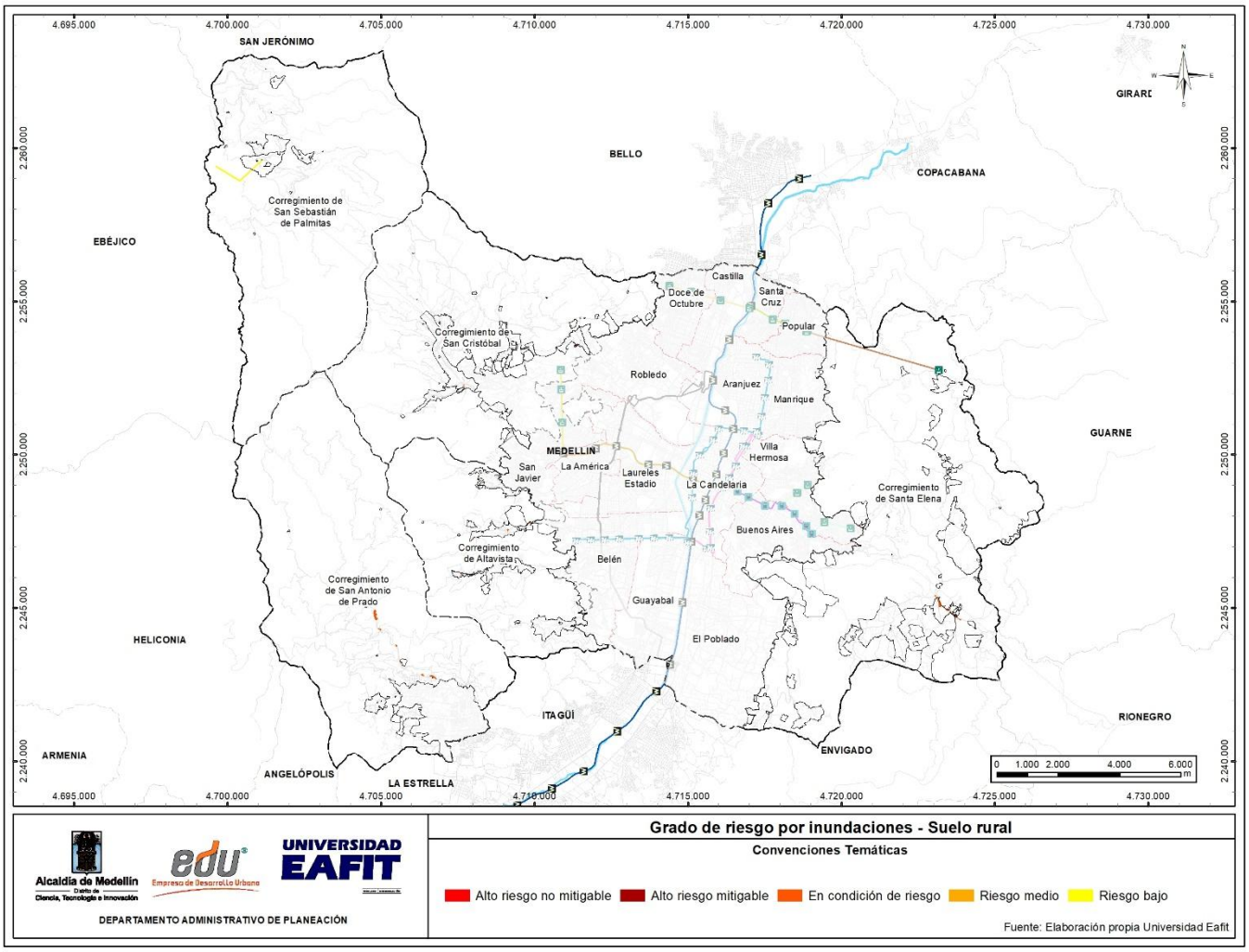


Ilustración 285. Áreas en la categoría de riesgo por inundación en estudios de detalle en el suelo rural

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

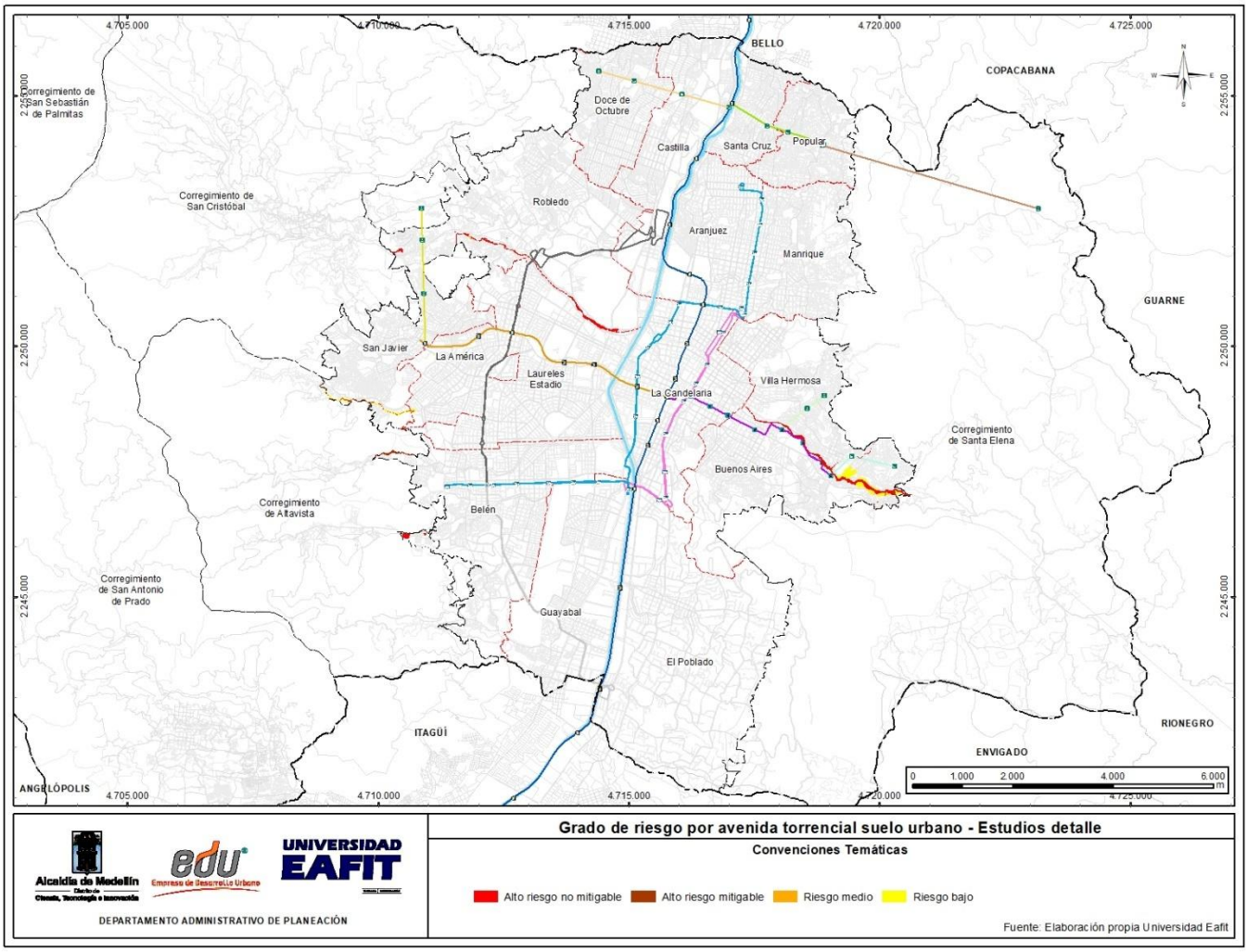


Ilustración 286. Áreas en la categoría de riesgo por avenidas torrenciales en estudios de detalle en el suelo urbano

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

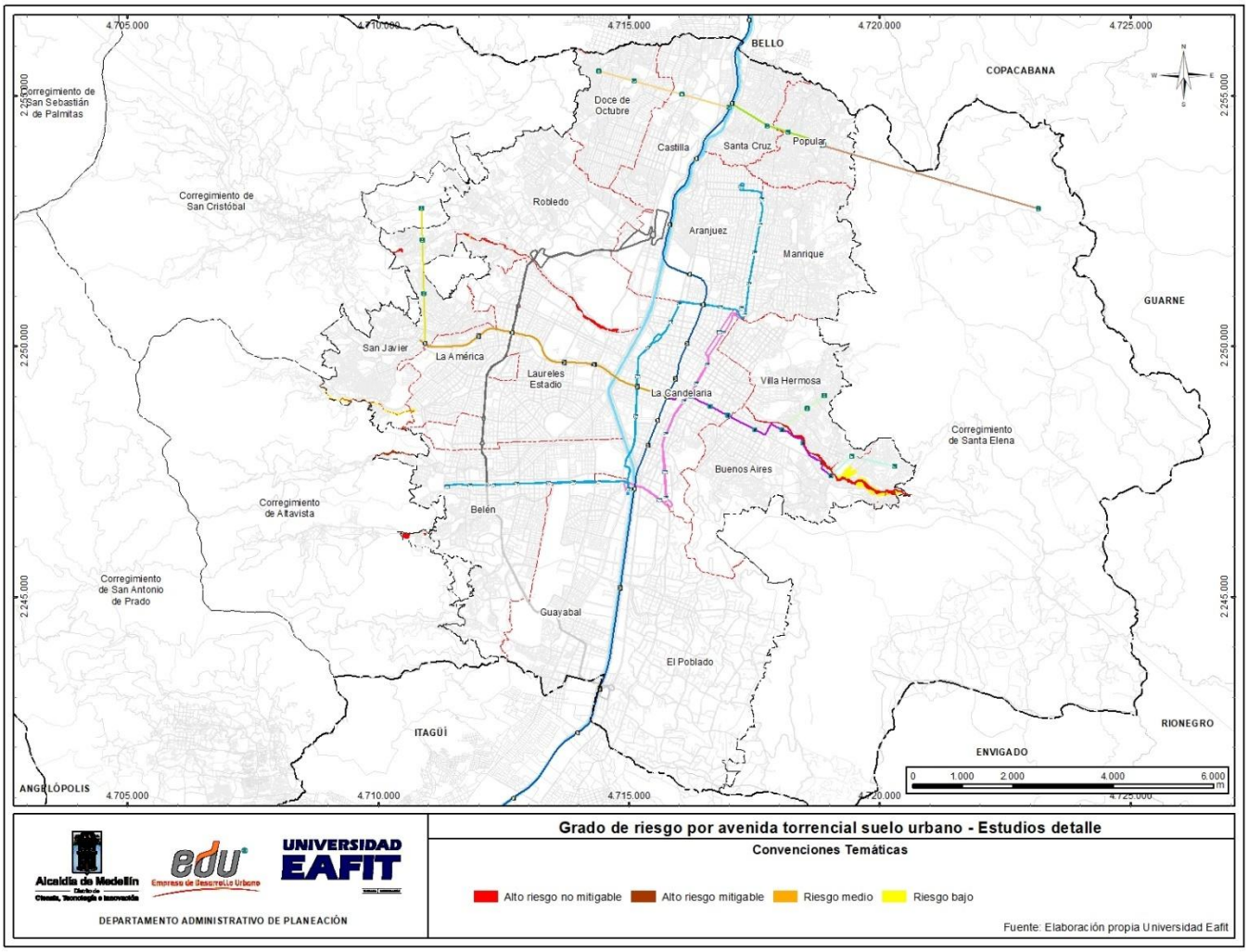


Ilustración 287. Áreas en la categoría de riesgo por avenidas torrenciales en estudios de detalle en el suelo rural

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

10.7 PRIORIZACIÓN DE ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES

En las áreas con condición de riesgo de todo el distrito se realizó la priorización de polígonos de acuerdo con el número de construcciones. Esta se realizó con la base catastral existente (Enero 2025), con la novedad de que esta capa no incluye algunos de los asentamientos subnormales.

En la Tabla 88 y Tabla 89 se presenta la priorización de polígonos por condición de riesgo para inundación y avenidas torrenciales (anexo 8 Priorización de ACR).

Para el caso particular de las inundaciones y avenidas torrenciales la priorización se da para los polígonos urbanos de las principales cuencas, donde debido a los cambios de pendiente o a la insuficiencia de obras hidráulicas se generan zonas de amenaza alta de una extensión significativa en la parte baja de estas, correspondiendo con zonas urbanas consolidadas.

Tabla 88. Priorización de polígonos con condición de riesgo por inundación del Distrito de Medellín

No	Código ACR	Barrio	Area (ha)	Clasificación del suelo	Quebrada
1	IURR_11_1113_1	Estadio	9,25	Urbano	Q. La Hueso
2	IURR_10_1011_3	Calle Nueva	9,58	Urbano	Q. Loreto
3	IURR_07_0725_1	Nueva Villa de La Iguaná	1,38	Urbano	Q. La Iguaná
4	IURR_04_0405_3	Moravia	0,72	Urbano	Q. La Bermejala
5	IURR_10_1008_2	Corazón de Jesús	5,79	Urbano	Zanjon Guanteros
6	IURR_10_1012_5	Perpetuo Socorro	5,65	Urbano	Q. Loreto
7	IURR_11_1103_1	Naranjal	1,25	Urbano	Q. La Magdalena
8	IURR_10_1012_1	Perpetuo Socorro	8,99	Urbano	Q. El Indio
9	IURR_70_AE5_3	Área de Expansión Altavista	0,72	Urbano	Escorrentía San Vicente
10	IURR_02_0211_4	La Rosa	0,87	Urbano	Q. La Rosa o Moscú
11	IURR_15_1502_3	Tenche	1,40	Urbano	Q. Altavista
12	IURR_04_0405_4	Moravia	0,33	Urbano	Q. La Bermejala
13	IURR_08_0808_4	Enciso	0,42	Urbano	Q. El Chocho
14	IURR_04_0405_5	Moravia	0,36	Urbano	Q. La Bermejala
15	IURR_07_0709_1	Córdoba	0,32	Urbano	Q. La Quintana

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 89. Priorización de polígonos con condición de riesgo por avenidas torrenciales del Distrito de Medellín

No	Código ACR	Barrio	Area (ha)	Clasificación del suelo	Quebrada
1	TURR_04_0405_2	Moravia	9,37	Urbano	Q. La Bermejala
2	TURR_04_0405_1	Moravia	6,69	Urbano	Q. La Chorrera o El Molino
3	TURR_16_1602_1	Rosales	17,06	Urbano	Q. La Picacha
4	TURR_11_1113_2	Estadio	7,43	Urbano	Cañada Honda
5	TURR_12_1203_3	Los Pinos	6,44	Urbano	Q. Ana Diaz
6	TURR_15_1502_1	Tenche	16,75	Urbano	Q. Altavista
7	TURR_10_1006_1	San Benito	12,48	Urbano	Q. La Loca
8	TURR_07_0709_3	Córdoba	1,30	Urbano	Q. La Quintana
9	TURR_11_1113_3	Estadio	10,98	Urbano	Q. La Hueso
10	TURR_13_1319_2	El Socorro	1,81	Urbano	Q. La Pelahueso
11	TURR_03_0302_2	Las Granjas	1,69	Urbano	Q. La Mansión
12	TURR_11_1105_6	Los Conquistadores	9,97	Urbano	Q. La Picacha
13	TURR_05_0519_1	El Progreso	10,75	Urbano	Q. Malpaso
14	TURR_11_1103_1	Naranjal	2,40	Urbano	Q. La Magdalena
15	TURR_14_1421_2	Patio Bonito	9,80	Urbano	Q. La Presidenta

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

11 ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

La evaluación de la amenaza por movimientos se definió de acuerdo con el modelo de base física basado en el flujo de trabajo metodológico que se presenta en la Ilustración 288. A continuación, se enlistan algunos detalles de la metodología propuesta.

- La tipología de movimientos en masa considerada se restringe únicamente a deslizamientos superficiales que se aproximan razonablemente bien al mecanismo de talud infinito implementado en TRIGRS. Esto es válido teniendo en cuenta que normalmente los eventos de precipitación de corta duración y alta intensidad tienden a detonar este tipo de movimientos en masa en zonas de ladera.
- La zonificación de la amenaza se definirá a partir de la Probabilidad de Falla (PF) espacial, considerando un número de categorías comparable a las del método estadístico. Los valores de PF que limitan las diferentes categorías se evaluarán con base en el rango de valores de PF calculados, su distribución y el desempeño del modelo (área bajo la curva ROC).
- Aunque la aproximación adoptada no depende rigurosamente del inventario de deslizamientos, estos se usaron para proponer los límites de la zonificación mediante la curva de éxito. En este caso se adoptó como umbral para la zona de susceptibilidad alta a media el índice que hiciera que se abarcara un 50% de deslizamiento de la zona de amenaza alta; para el umbral de susceptibilidad media a baja se tomó el índice que hiciera que se abarcara un 80% de los deslizamientos en las zonas de amenaza alta y media conjuntamente. Estos umbrales corresponden respectivamente a $2.4 * 10^{-3}$ y $4.4 * 10^{-3}$ de probabilidad anual de falla como se muestra en la Tabla 90.

Tabla 90 Intervalos de probabilidad de falla anual para la determinación de los niveles de amenaza

Categoría de amenaza	Proporción de deslizamientos del inventario (Umbrales en la curva de éxito)	Intervalos de probabilidad de falla	Intervalos de probabilidad de falla anual
Baja	< 20%	< 0.06	$< 2.4 \times 10^{-3}$
Media	20 - 50%	0.06 - 0.11	2.4×10^{-3} - $< 4.4 \times 10^{-3}$
Alta	> 50%	> 0.11	$> 4.4 \times 10^{-3}$

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

- El factor detonante lluvia evaluado se considera constante en el dominio espacial. La intensidad y duración de este se seleccionan con base en estimaciones realizadas sobre el evento que detonó las inestabilidades en la zona de estudio. De aquí que la evaluación de la

amenaza no considera explícitamente la probabilidad temporal, no obstante, la metodología se podría replicar para detonantes representativos de otros periodos de retorno.

- La PF espacial se determina mediante el método de Montecarlo, el cual consiste en generar $\boldsymbol{n}$ realizaciones de las variables aleatorias consideradas, en este caso los parámetros de resistencia teniendo en cuenta la incertidumbre de estos, y calculando el FS en cada realización, tal que la PF se determine como la proporción de realizaciones con FS < 1.0 respecto a $\boldsymbol{n}$. Los demás parámetros se consideran deterministas, no obstante, la metodología se podría replicar considerando más variables aleatorias.
- La distribución de las pendientes se calcula a partir del modelo de elevación digital del terreno levantado en fechas previas al evento que generó las inestabilidades en la zona de estudio.
- La distribución espacial de $\boldsymbol{Z_{max}}$ se determinará mediante retroanálisis como una función dependiente de la inclinación del terreno a partir de datos del inventario de deslizamientos.

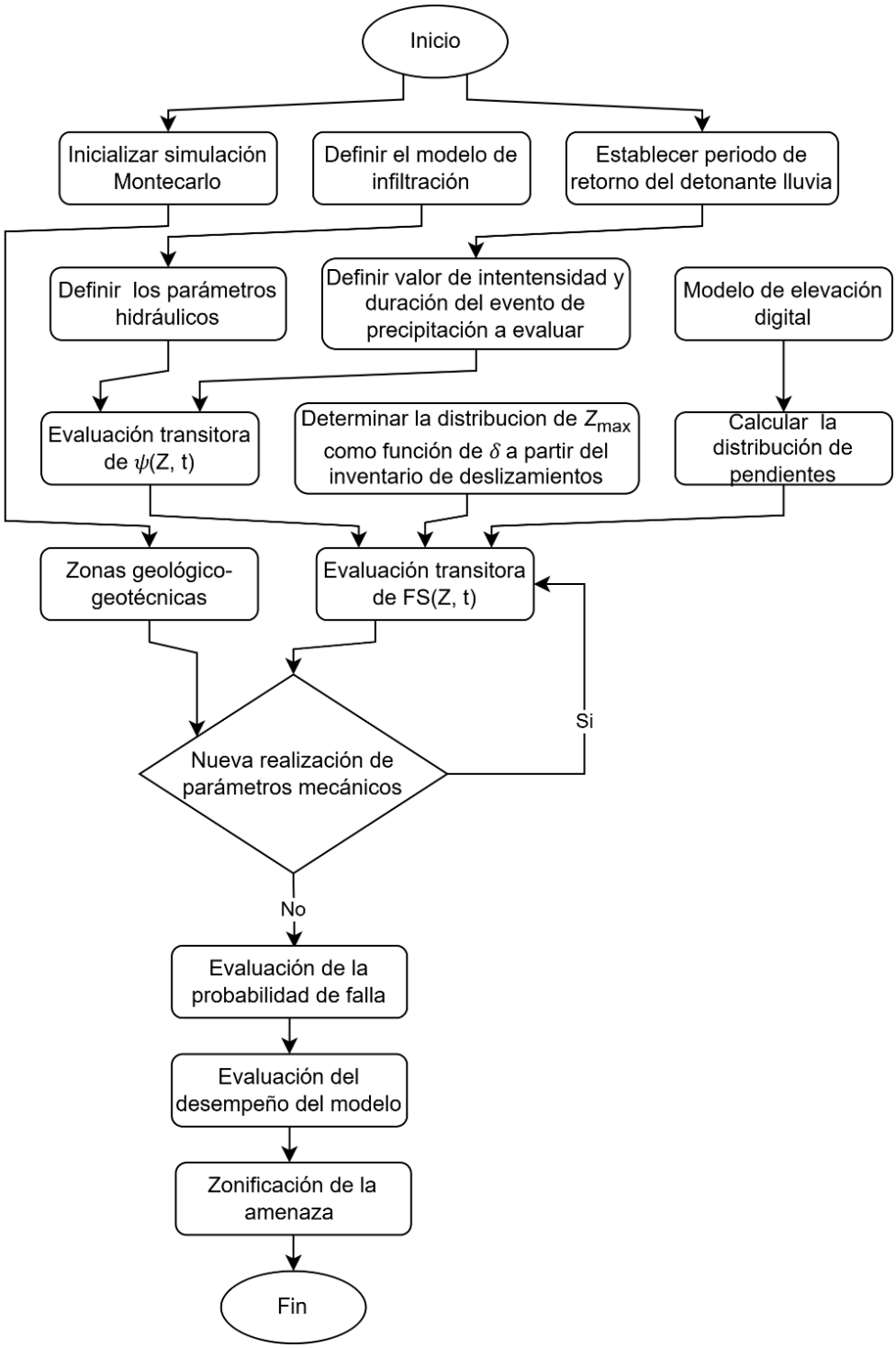


Ilustración 288. Metodología para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa a partir de la probabilidad espacial de falla

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

La amenaza por movimientos en masa se definió en tres categorías:

- **Amenaza alta:** Comprende laderas fuertes a muy fuertes (pendiente mediana ≈ 30°), concentradas en los escarpes de la ladera oriental y en franjas extensas del flanco occidental del valle, además de tramos marcados en las laderas de las quebradas La Iguaná y Doña María. Geológicamente dominan los depósitos de vertiente tipo flujo de lodos y/o escombros, el Stock de Altavista, rocas esquistosas de los complejos Baldías y Cajamarca y la Dunita de Medellín. La probabilidad de falla es elevada (~41 % de las SU con PF ≥ 0.20). Y concentra la mayor parte del inventario con un ~57 % de los deslizamientos registrados.

- **Amenaza media:** Relieves moderados a fuertes (pendiente mediana ≈ 26°). La probabilidad de falla disminuye considerablemente, concentrándose en valores de 0.07 a 0.09 (mediana 0.08). Geológicamente predominan el Stock de Altavista, rocas esquistosas, depósitos de vertiente tipo flujo de lodos y/o escombros, y rocas volcánicas y volcano-sedimentarias, litologías que mantienen susceptibilidad intermedia y concentraciones locales del inventario, abarcando un ~25 % del total de deslizamientos registrados.

- **Amenaza baja:** Abarca relieves suaves a moderados (pendiente mediana ≈ 14), incluyendo planicies aluviales y superficies en depósitos aluviotorrenciales, laderas bajas de los flancos del valle y superficies suaves en suelo residual en el altiplano. Geológicamente son comunes los depósitos de vertiente tipo flujo de lodos y/o escombros, las Anfibolitas de Medellín, unidades gabroicas (complejo Romeral y gabro de San Diego) y metabasitas, así como rocas metamórficas néisicas y milonitas. La probabilidad de falla es generalmente baja (mediana ≈ 0.01, usualmente ≤ 0.05) y abarca un ~19 % del inventario de deslizamientos.

La zonificación obtenida a partir del modelo de base física y de la propagación, es complementado con la información aportada por el Departamento Administrativo de Planeación correspondiente a los estudios de detalle protocolizados, adicionalmente se incluyen los movimientos en masa significativos identificados a partir de las bases de datos de los estudios geológico geotécnicos, SIATA, DAGRD y DAP, además del proceso de fotointerpretación realizado presentado en el capítulo de morfodinámica del documento. Es importante precisar que los inventarios de procesos morfodinámicos no constituyen un insumo externo incorporado únicamente al final del proceso, sino que hicieron parte de los análisis numéricos de zonificación desarrollados en la sección 6. Los inventarios de procesos morfodinámicos suministrados por DAGRD–SIATA y por el DAP fueron utilizados como insumo dentro de los análisis numéricos de zonificación de amenaza por movimientos en masa y fueron complementados mediante el proceso de fotointerpretación multitemporal desarrollado por EAFIT. Sin embargo, considerando la escala regional de los estudios básicos, la incertidumbre asociada a la localización y delimitación de algunos registros, la resolución de las variables de entrada y la naturaleza estadística y estocástica de los modelos empleados es posible que algunos procesos activos o significativos no queden clasificados inicialmente dentro de

zonas de amenaza alta. Esto es esperable en modelos probabilísticos regionales, los cuales constituyen aproximaciones basadas en datos y no soluciones analíticas exactas. Por esta razón, la zonificación final se complementó con la incorporación explícita de procesos morfodinámicos activos o significativos y con los resultados de zonificaciones provenientes de estudios de detalle suministrados para el Distrito, con el fin de mejorar la representación espacial de la amenaza y garantizar la coherencia técnica del producto final.

En la Ilustración 289 se presenta un esquema de la metodología para la obtención de la amenaza por estabilidad, en la Tabla 91 se presentan los Estudios de detalle incluidos en la zonificación y en la Ilustración 291 el mapa de zonificación de amenaza por movimientos en masa total.

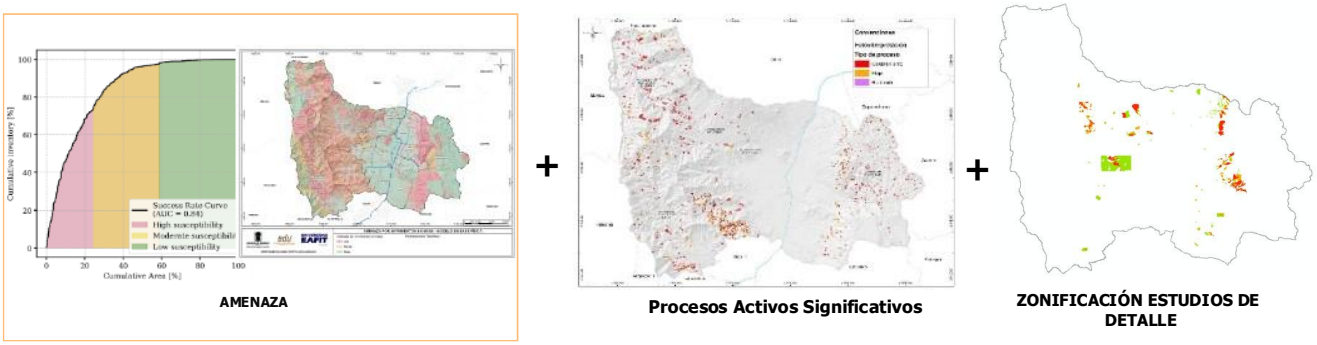


Ilustración 289. Esquema de la zonificación de la amenaza total por movimientos en masa en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Tabla 91. Estudios incorporados para la zonificación de amenaza por movimientos en masa.

Estudio incorporado	Área estudiada (m^2)
13 de Noviembre	2.236,85
Complex2	23.602,98
Contrato No 4600087101 de 2020 Macroproyecto Iguaná - Boquerón	26.981,67
Contrato No 4600087101 de 2020 Macroproyecto Iguaná - Pedregal Alto	26.775,67
Contrato No 4600087101 de 2020 Macroproyecto Iguaná - Pedregal Alto Unidad deportiva	20.210,07
Contrato No 4600087101 de 2020 Macroproyecto Iguaná - Quebrada La Lejía - El Patio	18.819,16
Contrato No 4600087101 de 2020 Macroproyecto Iguaná - Travesías	23.633,78
Contrato No. 3302-567 de 2019 Base Militar de Occidente	13.884,18
Convenio 4600076515 – 2018 - Nororiental – El Faro	187.372,95
Convenio 4600076515 – 2018 - Nororiental – La Sierra	87.222,70
Convenio 4600076515 – 2018 - Nororiental – Llanaditas	127.762,06
Convenio 4600076515 – 2018 - Nororiental – Trece de Noviembre	43.506,07
Convenio 4600076515 – 2018 - Nororiental – Villa Liliam	206.189,16
Convenio 4600076515 – 2018 - Nororiental – Villa Turbay	365.117,15

Estudio incorporado	Área estudiada (m^2)
Convenio 4600076515 – 2018 - Nororiental –San Antonio	82.186,28
Ecoparque La Riviera	130.268,89
Era Palmera, pasa a ser Herbazal	438,40
Estudio - El Papi	122.471,54
Estudio - Metropolitano	9.667,58
Estudio GEOCING 2012 Barrio La Libertad	87.419,57
Estudio El Tesoro	6.790,95
Estudio Herbazal	139.870,35
Estudio La Palma	85.201,31
Estudio Los Pisquines	24.424,98
Estudio Metrocable El Picacho	38.284,80
Estudio Parque El Popular	8.990,51
Estudio San Luis de la Calera	20.041,28
Estudio Transversalidades - Blanquizal	3.269,40
Estudio Transversalidades - Brisas del Jardín	128.591,14
Estudio Transversalidades - Candamo	17.880,38
Estudio Transversalidades - Caracolí	10.582,08
Estudio Transversalidades - Chorro Hondo	57.422,33
Estudio Transversalidades - El Pesebre	118.870,03
Estudio Transversalidades - El Vergel La Pastora	2.321,82
Estudio Transversalidades - Juan Pablo II	69.941,34
Estudio Transversalidades - La Arenera	23.442,65
Estudio Transversalidades - La Arenera - Convenio 4600076515 – 2018 - Nororiental – La	2.929,77
Estudio Transversalidades - Las Estancias	26.897,69
Estudio Transversalidades - Loreto	10.759,05
Estudio Transversalidades - Olaya Herrera	191.758,36
Estudio Transversalidades - Pajarito	364.902,54
Estudio Transversalidades - San Antonio	7.884,44
Estudio Transversalidades - Santa Elena	28.152,53
Estudio Transversalidades - Santa Elena - Juan Pablo II	8.600,27
Estudio Transversalidades - Santa Margarita	3.714,87
Estudio Transversalidades - Vallejuelos	83.674,60
Estudio Transversalidades - Villa Liliam	50.283,05
Estudio Transversalidades - Villa Liliam - Convenio 4600076515 – 2018 - Nororiental – Villa	22.988,54
Estudio Transversalidades - Villa Mercedes	32.933,35
Estudio Transversalidades - Villatina Torcoroma	38.696,09
Estudios de amenaza de detalle, lote SE-RAR 22 de la institución educativa Colegiatura	200.245,17

Estudio incorporado	Área estudiada (m^2)
Granja Agroindustrial	301.761,58
La Palmera	7.213,55
La Picacha	22.317,34
Los Balsos	15.872,75
Los Builes	49.285,04
Plan Parcial Carabineros	133.430,83
Provenza	4.720,68
Sin relacionar ficha pero en GDB	213,42
Unidos Por El Agua- Circuito El Corazón - Betania	13.744,10
Unidos Por El Agua- Circuito El Corazón - El Salado	180.153,58
Unidos Por El Agua- Circuito El Corazón - Las Independencias	75.803,73
Unidos Por El Agua- Circuito El Corazón - Nuevos Conquistadores	134.874,71
Unidos Por El Agua- Circuito Santo Domingo - El Compromiso	90.168,49
Unidos por El Agua- Circuito Santo Domingo - Granizal	27.228,76
Unidos por El Agua- Circuito Santo Domingo - Granizal y Visita Granizal	2.101,22
Unidos por El Agua- Circuito Santo Domingo - La Seca	15.679,28
Unidos por el Agua - Circuito los Mangos - Llanaditas	75.307,64
Unidos por el Agua - Circuito Santo Domingo - La Cima	378.283,58
Unidos por el Agua - Circuito Santo Domingo - La Esperanza	108.796,32
Unidos por El Agua Circuito Santo Domingo - El trébol	32.639,28
Unidos por El Agua Circuito Santo Domingo - El Trebol y Visita Santo Domingo Savio No.2	8.253,80
Unidos por El Agua Circuito Santo Domingo - La Avanzada	85.088,26
Unidos por El Agua Circuito Santo Domingo - La Secal	54.080,03
Unidos por El Agua Circuito Santo Domingo - La Secal y Visita Santo Domingo Savio No.2	12.417,06
Unidos por El Agua Circuito Santo Domingo - LaAvanzada y Visita Santo Domingo Savio No.2	11.992,46
Visita VillaTurbay - Convenio 4600076515 – 2018 - Nororiental –San Antonio	40,70
Visita VillaTurbay - Convenio 4600076515 – 2018 - Nororiental –Villa Liliam	10.421,72
Visita VillaTurbay - Convenio 4600076515 – 2018 - Nororiental –Villa Turbay	31.704,36

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Adicional a los estudios de detalle y los procesos morfodinámicos activos significativos, se anexaron a la zonificación de amenaza por movimiento en masa, los estudios geológico geotécnicos del DAGRD, llenos antrópicos con evidencia de inestabilidad o falla, zonas declaradas con riesgo no mitigable y las zonas con características especiales de caída de roca sobre la ladera oriental del valle, localizadas sobre el sector central y occidental de la vereda Media Luna, a lo largo del sector occidental de la vereda Piedras Blanca - Matasanos, en el barrio Llanaditas; en el límite de los barrios Versalles No 1 y No 2 y en el barrio Oriente. En la ladera occidental del Distrito, se ubican sobre las

laderas del cerro El Picacho y al norte de las veredas San José de las Montaña y Boquerón (Tabla 92, Ilustración 290 e Ilustración 291).

Tabla 92. Fuente de la zonificación de amenaza por movimientos en masa del Distrito de Medellín

Fuente cartográfica	Amenaza alta (%)	Amenaza media (%)	Amenaza baja (%)	Total (%)
Estudio detalle	0,69	0,41	0,39	1,49
Llenos	0,01	0,00	0,00	0,01
Modelo estudio básico	33,20	14,39	47,56	95,15
Procesos morfodinámicos	1,02	0,00	0,00	1,02
Runout	1,95	0,00	0,00	1,95
Zona de alto riesgo no mitigable por movimiento en masa	0,28	0,00	0,00	0,28
Zona de caída de roca	0,11	0,00	0,00	0,11
Total (%)	**37,25**	**14,80**	**47,95**	**100,00**

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

A nivel regional, la amenaza con mayor representación en el Distrito de Medellín es la amenaza baja con el 47,95% del área total, seguido con la amenaza alta y media con el 37,25% y 14,80 % respectivamente (*Tabla 93*).

Tabla 93. Áreas por categoría de amenaza por movimientos en masa del Distrito de Medellín

Amenaza por movimientos en masa	Área (ha)	Área (%)
Baja	18.046,67	47,95%
Media	5.568,89	14,80%
Alta	14.024,11	37,25%
Total	**37.639,66**	**100,00%**

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

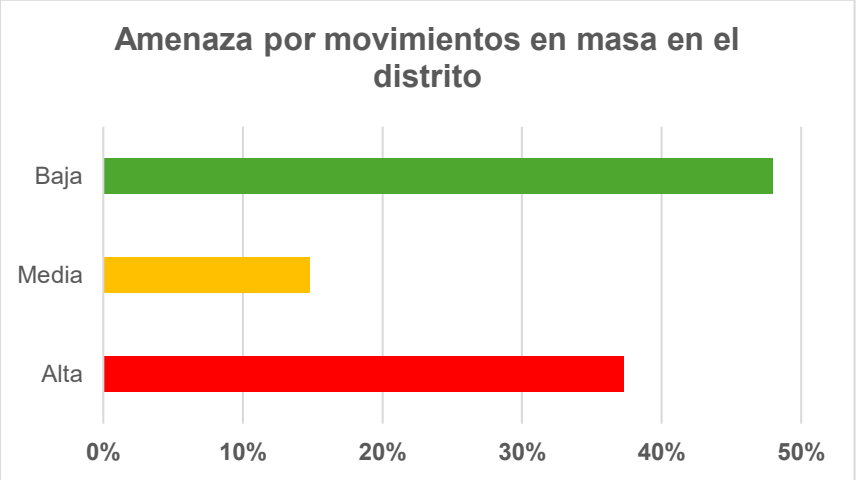


Ilustración 290. Distribución de la amenaza por movimientos en masa del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

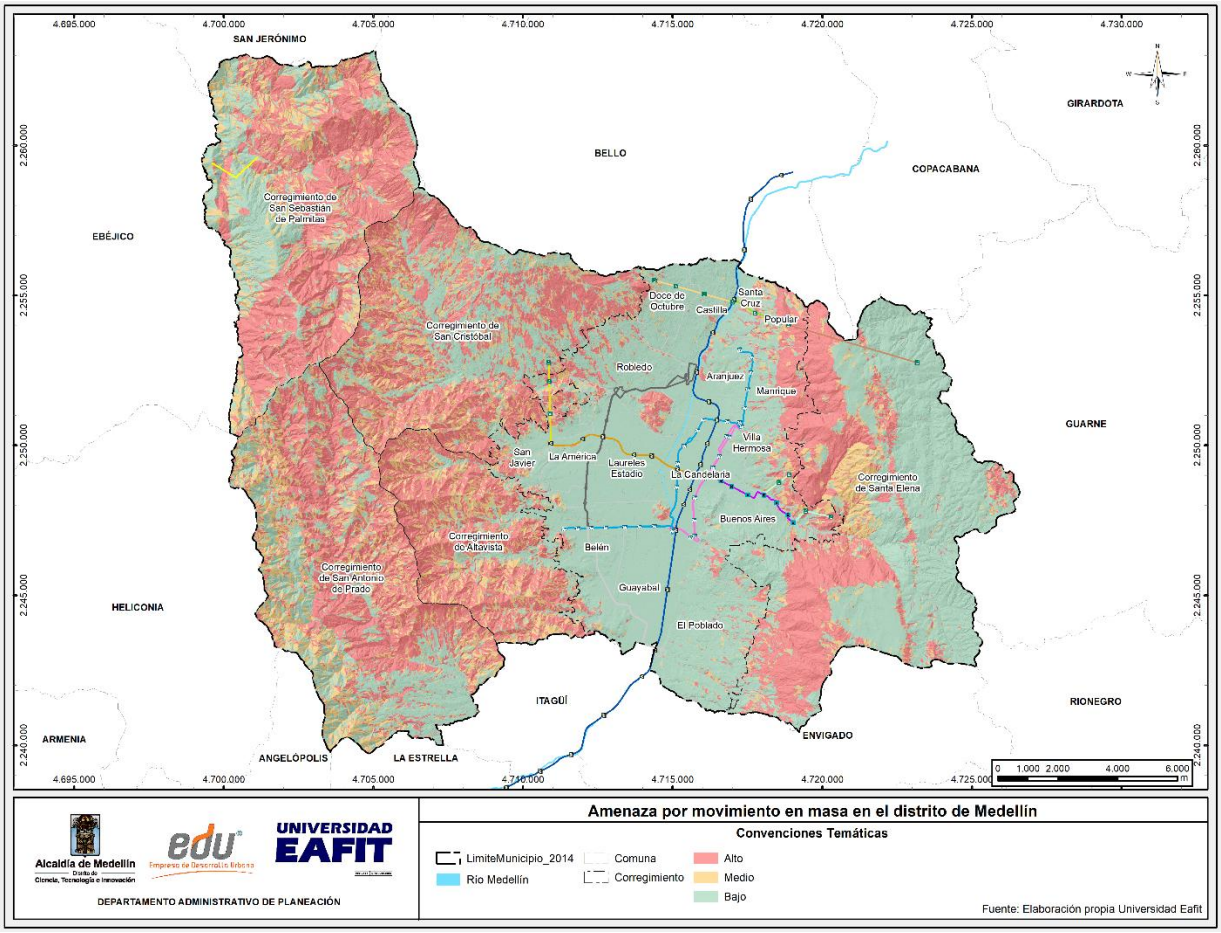


Ilustración 291. Amenaza por movimientos en masa del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

11.1 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA DEL SUELO RURAL

En la Tabla 94 y Tabla 95 se presentan las áreas de las categorías alta, media y baja de amenaza por movimiento en masa para cada uno de los corregimientos con suelo rural ~~(Urbano – rural)~~ del Distrito de Medellín (Ilustración 292)~~, igualmente de las zonas definidas en el POT como SN01 y SN02 se incluyen en esta descripción~~.

Tabla 94. Áreas de amenaza por corregimientos del Distrito de Medellín

Corregimiento	Amenaza alta Área (ha)	Amenaza media Área (ha)	Amenaza baja Área (ha)
San Sebastián de Palmitas (50)	3.046,21	1.056,58	1.531,76
San Cristóbal (60)	2.347,68	936,80	1.123,01
Altavista (70)	1.604,23	707,75	290,37
San Antonio de Prado (80)	2.669,63	1.491,70	1.391,27
Santa Elena (90)	2.371,82	596,20	3.647,24

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 95. Áreas de amenaza total del suelo rural del Distrito de Medellín

Amenaza por movimientos en masa	Área (ha)	Porcentaje de área (%)
Baja	7.983,65	32,18%
Media	4.789,03	19,30%
Alta	12.039,56	48,52%
Total	**24.812,24**	**100,00%**

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

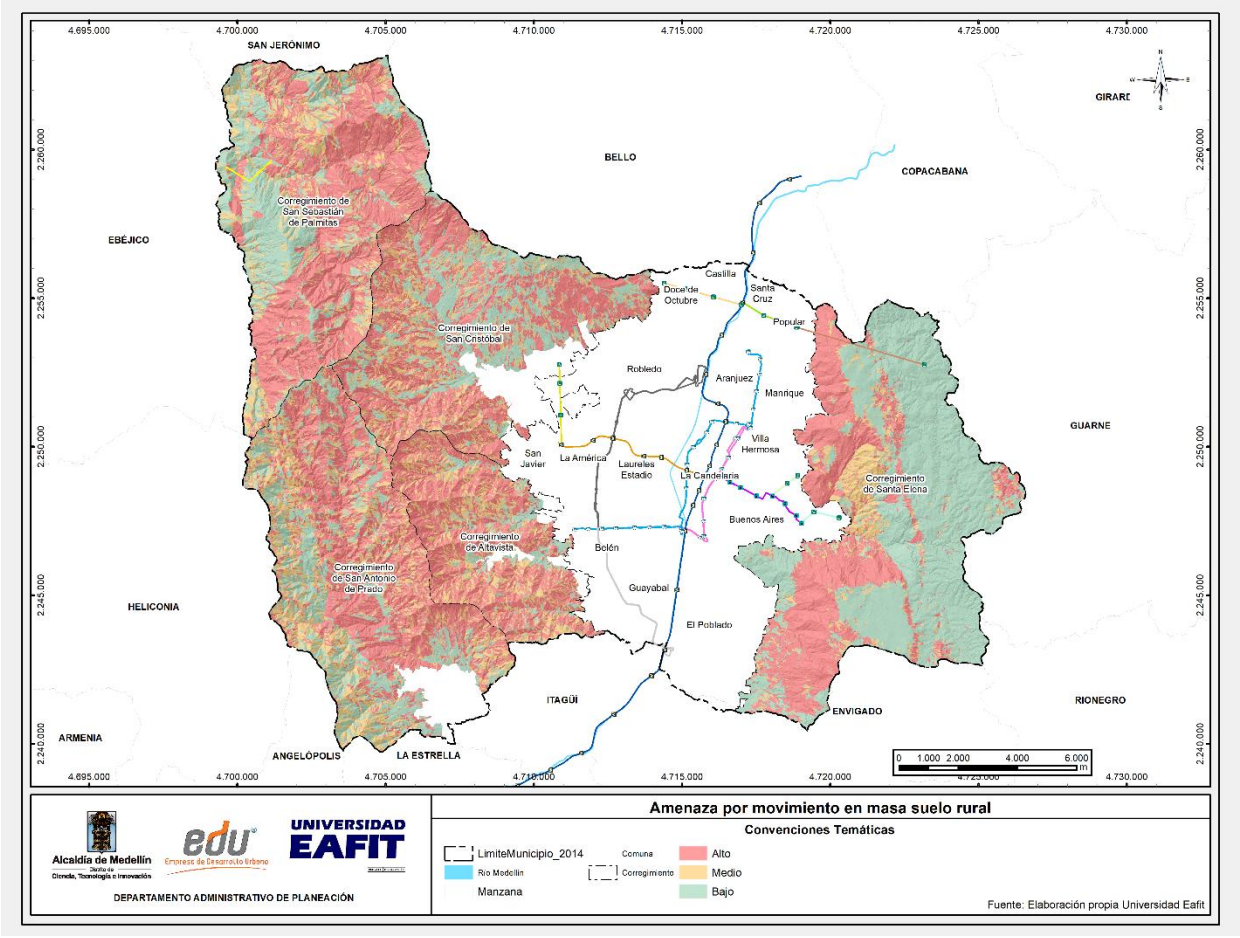


Ilustración 292. Amenaza por movimientos en masa del suelo rural del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Los corregimientos de Altavista, San Antonio de Prado, San Cristóbal y San Sebastián de Palmitas presentan más del 70% de su jurisdicción en las categorías de amenaza alta y media por movimientos

en masa, siendo Altavista el que presenta la mayor área con un 88,84% de su territorio en estas categorías.

Cabe destacar que, el 55,13% del área del corregimiento de Santa Elena se categoriza en amenaza baja por movimientos en masa siendo el que menos áreas presenta en las categorías media y alta (Ilustración 293).

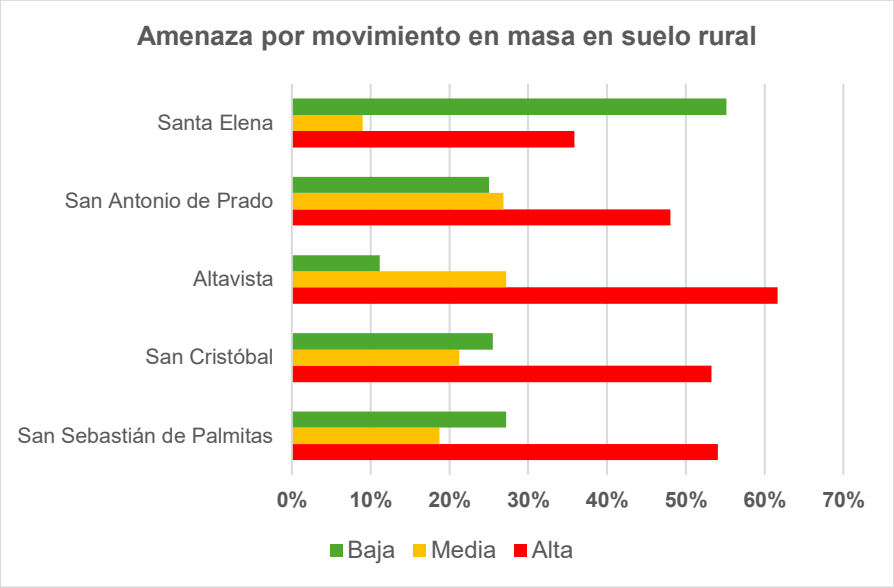


Ilustración 293. Distribución de la amenaza por movimientos en masa en los corregimientos del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 96. Áreas de amenaza por movimientos en masa del suelo rural del Distrito de Medellín

Área Rural	Ubicación	Alta (ha)	Media (ha)	Baja (ha)
Corregimiento Santa Elena (90) (11 veredas)	La amenaza alta y media se ubica concentrada sobre el sector occidental del corregimiento, cubriendo la zona occidental y central de las veredas Piedras Blancas – Matasanos; al oriente, norte y occidente de la vereda Media Luna y sobre el sector norte, oriente y sur de la vereda Las Palmas; al norte, occidente y sur occidente de la vereda El Plan. Al sur del corregimiento se presenta al occidental de la vereda Santa Elena Sector Central; al oriente y occidente de la vereda El Llano y al suroccidente y centro de la vereda El Cerro; en el sector central y oriental de la vereda Barro Blanco; al occidente de la vereda Mazo y en una franja con dirección norte – sur de la Vereda Piedras Blancas – Matasanos. La amenaza baja se localiza distribuida en el sector norte, centro, oriente y sur del corregimiento, cubriendo las veredas Piedras Blancas -Matasanos, Mazo, Barro Blanco,	2.371,81	596,20	3.647,24

Área Rural	Ubicación	Alta (ha)	Media (ha)	Baja (ha)
	Piedra Gorda El Placer. Media luna, El Plan, Santa Elena Sector Central, El Cerro y El Llano; adicionalmente se presentan algunos polígonos sobre el extremo occidental y suroriental de la vereda Las Palmas.			
Corregimiento San Antonio de Prado (80) (8 veredas, cabecera y zona de expansión)	La amenaza alta y media se localiza principalmente sobre el sector norte, centro, oriente y suroriente del corregimiento, cubriendo de manera extensa las veredas El Astillero, El Salado y La verde, y de manera parcial el oriente de las veredas Yarumalito, Montañita y Potrerito y al occidente y centro de la vereda San José. La amenaza media cubre todo el occidente y suroccidente del corregimiento, sectores norte, occidente y sur de la vereda Yarumalito, occidente de la vereda Montañita y norte – centro y sur de la vereda Potrerito y distribuida a lo largo de la vereda La Florida. La amenaza baja se encuentra con mayor expresión en el sector occidental del corregimiento, relacionada directamente a la amenaza media y de manera dispersa sobre el sector nororiente, centro y sur del corregimiento con mayor relevancia en las veredas La Florida, Potrerito y San José.	2.669,63	1.491,70	1.391,27
Corregimiento Altavista (70) (7 veredas, 3 áreas de expansión y 1 cabecera)	La amenaza alta y media es la de mayor extensión a lo largo de todas las veredas del corregimiento, excepto las zonas de menos pendiente asociadas a los depósitos aluviales y aluviotorrenciales de las principales corrientes que presentan amenaza baja.	1.604,23	707,75	290,37
Corregimiento San Cristóbal (60) (17 veredas, 2 áreas de expansión y 1 cabecera)	La amenaza alta y media se localizan al nororiente del corregimiento en las veredas Yolombó, El Carmelo, Pajarito y El Picacho; al norte del corregimiento en las veredas San José de la Montaña, Boquerón y Naranjal; al occidente del corregimiento en las veredas La cuchilla, El Uvito, El Patio y La Palma; al sur y sur oriente en la vereda La Loma y sobre el sector central del corregimiento en las veredas Las Playas, Travesías, El Llano, San José de la Montaña, La Ilusión y Pedregal Alto. La amenaza baja se distribuye de manera aleatoria en el área del corregimiento, con una tendencia hacia la zona	2.347,68	936,80	1.123,01

Área Rural	Ubicación	Alta (ha)	Media (ha)	Baja (ha)
	norte, centro y nororiental, en las veredas San José de la Montaña, La Ilusión y Yolombó y en veredas El Llano, Travesías y Pedregal Alto			
Corregimiento San Sebastián de Palmitas (50) (7 veredas y sector central)	La amenaza alta y media se encuentra sobre el sector norte, cubriendo el sector central, norte y oriente de la vereda Urquitá; al centro del corregimiento cubriendo las veredas Potrera-Miserenga, La Aldea y el sector occidental de las veredas Palmitas sector central y Volcana – Guayabal; al oriente del corregimiento cubriendo las veredas Palmitas sector central, Volcana – Guayabal y el sector oriental de la vereda La Frisola; al sur y suroccidente del corregimiento sobre todo el sector sur de la vereda la Suiza; en el sector occidental del corregimiento cubriendo las áreas noroccidental de las veredas La Suiza y La Frisola y polígonos aleatorios de la vereda La Sucia. La amenaza baja se encuentra con mayor representación en la zona occidental del corregimiento, cubriendo el sector norte de las veredas La Frisola y La Suiza; a lo largo de la vereda La Sucia y al occidente de la vereda Urquitá. En el sector norte del corregimiento se ubica al occidente de la vereda Potrera – Miserenga y sector central de las veredas Urquitá y Miserengá. Al noreste y este del corregimiento, cubriendo el sector oriental de las veredas Urquitá, Potrera-Miserenga y Palmitas Sector Central.	3.046,21	1.056,58	1.531,76

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

11.2 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA DEL SUELO SUBURBANO

En la Tabla 97 se presentan la descripción de la ubicación de las categorías alta, media y baja de amenaza por movimiento en masa para cada uno de los polígonos definidos en el POT como suelo Suburbano del Distrito de Medellín, esta distribución incluye las categorías de desarrollo restringido relacionadas con áreas destinadas a la parcelación de vivienda campestre, áreas para la localización de equipamientos y suelos suburbanos propiamente dichos (Ilustración 294).

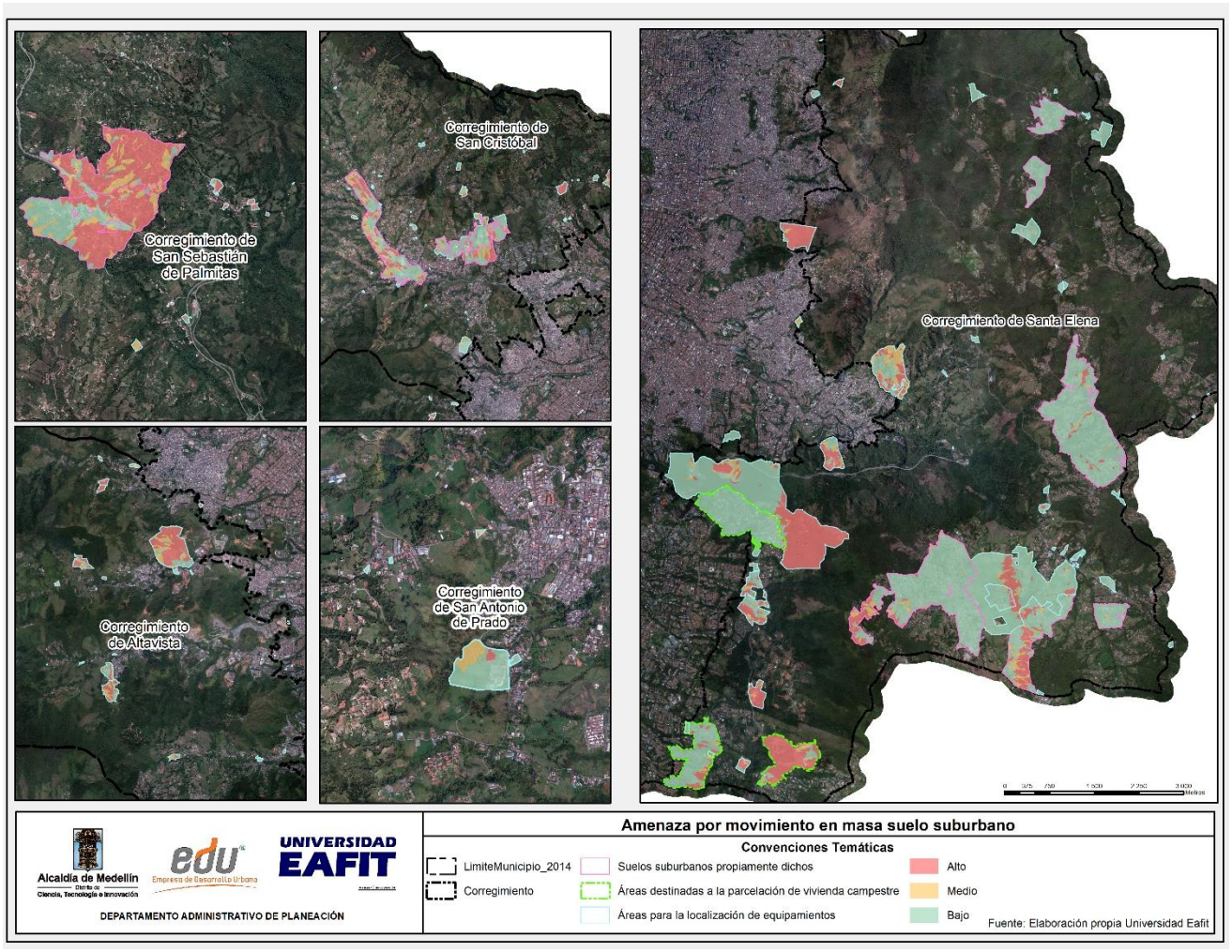


Ilustración 294. Amenaza por movimientos en masa del suelo suburbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Los suelos suburbanos con áreas destinadas a la parcelación de vivienda campestre, áreas para la localización de equipamientos y suelos suburbanos propiamente dichos que tienen más del 80% del área en amenaza alta y media por movimiento en masa son los polígonos de La Loma, Aldea 2, Chacaltaya, Palmitas Central y Corazón – El Morro; los polígonos de Urquitá, Aldea, Conexión Aburrá Cauca y Pajarito tienen entre el 40 y 80% del área en amenaza alta y media; los polígonos de Aguas Frías – San Pablo, El Cerro, El Llano, El Placer, El Plan, El Tesoro, Mirador El Poblado, Pedregal Alto, Potrerito y San José del Manzanillo tienen tienes menos del 39% del área en estas categorías. Los polígonos de Barro Blanco, Buga Patio Bonito, La Florida, La Palma, Mazo, Piedras Blancas, Piedras Blancas – Chorro Clarín y Santa Elena – sector central tienen el 100% de su territorio en amenaza baja por movimientos en masa (Ilustración 300 y Tabla 97).

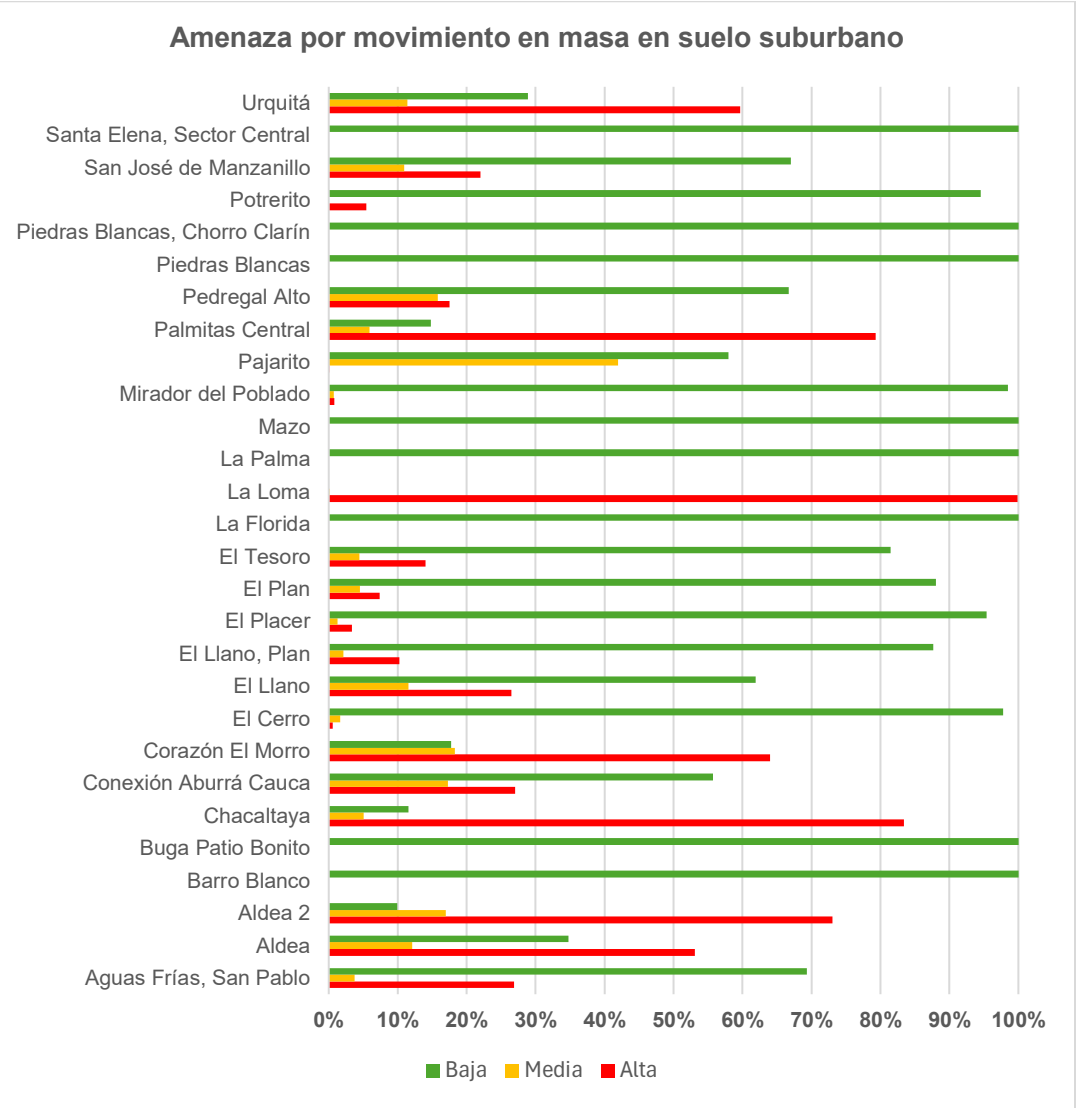


Ilustración 295. Distribución de la amenaza por movimientos en masa del suelo suburbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 97. Áreas de amenaza por movimientos en masa del suelo suburbano del Distrito de Medellín

Área Suburbana	Ubicación	Alta (ha)	Media (ha)	Baja (ha)
La Florida	La amenaza alta y media se localiza hacia extremo suroccidental del polígono, entre la quebrada La Limona 1 y La Mauala; al norte y occidente del polígono, sobre las laderas de la quebrada La Manguala; al centro y sur del polígono sobre las ladras de la quebrada La Cabuyala y al oriente del polígono en el afluente de la quebrada La Manguala y La Cabuyala.	0,00	0,00	0,21

Área Suburbana	Ubicación	Alta (ha)	Media (ha)	Baja (ha)
	La amenaza baja se localiza al occidente, suroccidente y parte centro oriental del polígono sin una tendencia especifica.			
Conexión Aburrá Cauca	La amenaza alta y media se ubican en: el extremo suroriental entre los drenajes quebrada La Potrera y Caño C; al oriente sobre las laderas de la quebrada La Iguaná; al norte sobre las laderas de las quebradas La Culebra y laderas occidentales de la conexión vial; al occidente del polígono sobre las laderas occidentales de la conexión, entre las quebradas La Cuchilla y Cinco Pasos y el extremo sur occidental del polígono asociado a las laderas de la quebradas Potreritos y La Aguada. La amenaza baja se encuentra localizado, sobre las llanuras aluviales y terrazas de las quebradas Potreritos, La Aguada, La Tenche, El Uvito hasta su desembocadura en la quebrada La Iguaná; zonas y llenos antrópicos correspondientes a la franja de la conexión Aburra Cauca.	30,75	19,67	63,48
El Cerro	La amenaza alta y media se ubica sobre el sector oriental del polígono, en las laderas sur de la quebrada Por Fin; en un sector pequeño ubicado al centro del polígono. La amenaza baja es la de mayor representación en el polígono y cubre los sectores norte, centro, occidente y suroriente del mismo.	0,11	0,33	19,38
El Llano, Plan	Las amenazas alta y media se ubican sobre el sector oriental del polígono, cubriendo las partes altas y de mayor pendiente. La amenaza baja se ubica en el sector central, occidental y sur del polígono.	1,61	0,33	13,83
Santa Elena, Sector Central	La amenaza alta y media se ubican en sector norte entre las quebradas El Tesoro y Santa Elena; en el sector centro occidental del polígono sobre las laderas de las quebradas La Bocana y Las Colonias; Al oriente del polígono, en las laderas de la quebrada Santa Teresa. La amenaza baja se localiza en el sector norte en las laderas de menor pendiente entre las quebradas Santa Elena y El Tesoro; en el sector central, oeste y sur del polígono entre las quebradas Las Colonias y Santa Elena; en el sector oriental del polígono, entre las quebradas Santa Teresa y La Cerca.	0,00	0,00	2,13

Área Suburbana	Ubicación	Alta (ha)	Media (ha)	Baja (ha)
El Tesoro	La amenaza alta y media se ubica sobre el sector norte, sobre las laderas de la quebrada San Juan; en el sector central del polígono se ubica sobre las laderas de las quebradas La Aguacatala, La Chacaltaya, La Chacaltaya 1, Chacaltaya 2 y La Paulita; en el extremo sur oriental del polígono, sobre la parte alta de las quebradas La Paulita ramal1 y la Paulita ramal 3. Y las laderas del sector norte de la quebrada Zuñiga La amenaza baja se ubica sobre el sector centro, occidente y suroccidente del polígono, entre las quebradas La Chacaltaya y Zuñiga; además del sector ubicado al norte, entre la quebrada La Aguacatala y Las laderas de la parte alta de la quebrada San Michel.	8,50	2,68	49,25
Chacaltaya	La amenaza alta y media se ubica en casi la totalidad del polígono, excepto el área ubicada en el sector suroccidental (Avenida Las Palmas) y en el extremo nororiental, en zonas de baja pendiente ubicadas en el sector norte y sur de la quebrada Carrizal y norte de la quebrada Babulón.	40,60	2,45	5,63
El Llano – Santa Elena	Las amenazas alta y media se ubican al norte del polígono, se encuentra sobre las laderas de la quebrada san Pedro 1 y las laderas de la vertiente sur de la quebrada Ciénaga. Sobre el sector centro oriental y sur del polígono asociado a las laderas de las quebradas La Yegua, San Pedro 3, San Pedro 2 y Cañada Negra. La amenaza baja se ubica en el sector centro y oriental del polígono, sobre las laderas de las quebradas Cañada Negra y San Pedro 2; y en el sector sur y suroriental sobre las laderas de la quebrada San Pedro 2; San Pedro 3 y La Yegua Adicionalmente la amenaza baja se ubica en el sector norte del polígono sobre ambos flancos de la quebrada San Nicolas y parte alta de su nacimiento; en el sector occidental del polígono, en las zonas de menor pendiente del nacimiento de la quebrada Cañada Negra y al suroccidente del polígono, en las zonas de menor pendiente de la parte alta de la quebrada San Pedro 3.	19,95	8,73	46,60
San José de Manzanillo	La amenaza alta y media se ubica en casi la totalidad del polígono, excepto los sectores de llanura aluvial y terrazas de la quebrada La Guayabala, caño Manzanillo, El Pelón y Potrerito; en el sector nororiental del polígono sobre la margen oeste del caño Manzanillo y al suroccidente del	0,18	0,09	0,55

Área Suburbana	Ubicación	Alta (ha)	Media (ha)	Baja (ha)
	polígono sobre las laderas de la parte alta de la quebrada Las Mercedes.			
Buga Patio Bonito	La amenaza alta y media se ubica sobre el sector sur, centro y occidental limitado por las quebradas Los Naranjos (norte) y ambas vertientes de la quebrada Buga. La amenaza baja se ubica en el sector nororiental, sobre la vertiente norte de la quebrada La Buga, aguas arriba de la desembocadura de la quebrada Christmas y sobre el norte de la quebrada La Buga, aguas abajo de la desembocadura de la quebrada Christmas.	0,00	0,00	0,21
Aguas Frías, San Pablo	La amenaza alta y media se ubican en casi la totalidad del polígono, excepto las zonas de llanura aluvial, terrazas, topes y llenos localizados en el sector sur, centro y con mayor extensión en el extremo oriental el polígono.	0,30	0,04	0,77
Pajarito	La amenaza alta y media se localiza en el sector nororiental y oriental del polígono, sobre la vertiente occidental de la quebrada La Corcovada y la vertiente oriental de la quebrada La García; en el sector central del polígono, sobre las laderas de las quebradas La Guagüita, Acequia Arriba y La García; en el sector sur y suroccidental del polígono, sobre la vertiente occidente de la quebrada La Guagüita hasta el límite con la quebrada La Puerta, incluyendo las laderas de la quebrada Las Hamacas. La amenaza baja se localiza sobre las zonas de menor pendiente asociadas a las quebradas La Guagüita, Acequia Arriba, La García y La Cican.	0,00	0,24	0,33
El Placer	La mayor área del polígono se ubica en amenaza baja, a excepción de sectores con amenaza alta y media que se ubican sobre el sector norte del polígono, asociado a las laderas de la parte alta de la quebrada Piedra Gorda; en el sector Central del polígono asociado las laderas de las quebradas La Ramírez, La Julián y La Soto; en el sector sur y suroriental del polígono sobre las laderas de las quebradas Santa Barbara, La Brava y La del Medio.	5,44	2,11	155,16
Piedras Blancas, Chorro Clarín	La totalidad del polígono se ubica en amenaza baja.	0,00	0,00	19,41

Área Suburbana	Ubicación	Alta (ha)	Media (ha)	Baja (ha)
Piedras Blancas	La totalidad del polígono se ubica en amenaza baja.	0,00	0,00	24,04
Barro Blanco	Casi la totalidad del polígono se ubica en amenaza baja, excepto las zonas con amenaza alta y media ubicadas sobre el sector nororiental del polígono, asociado a las laderas de mayor pendiente de la parte alta de la quebrada La Ruiz.	0,00	0,00	27,65
Pedregal Alto	La amenaza alta y media se concentran hacia el costado norte y sur de los polígonos, sobre laderas de mayor pendiente de las quebradas La Bermejala y el Hato o La Guayaba respectivamente. La amenaza baja se ubica al occidente sobre las áreas de menor pendiente entre las quebradas Pedregal; en el sector central del polígono.	17,55	15,83	66,84
La Palma	La amenaza alta y media se ubica al norte del polígono, en las laderas de mayor pendiente entre la quebrada Potreritos y La Lejía; en el sector centro sur del polígono en las laderas de mayor penite de las quebradas La Aguada y Potreritos; en el sector suroccidental de polígono, asociado a las laderas de mayor pendiente de la vertiente suroriental de la quebrada Potrerito. La amenaza baja se encuentra relacionada a las llanuras aluviales y aluviotorrenciales de las quebradas Potreritos, La Aguada, La Lejía, Cinco Pasos y La Palma.	0,00	0,00	0,19
Urquitá	Casi la totalidad del polígono se encuentra en amenaza alta y media, excepto algunos sectores asociados a las zonas de menor pendiente de la quebrada La Arenera.	0,06	0,01	0,03
Mazo	La totalidad del polígono se ubica en amenaza baja.	0,00	0,00	1,68
Aldea 2	Casi la totalidad del polígono se encuentra en amenaza alta y media, excepto algunos sectores de menor pendiente asociados a corredor vial Aburra Cauca y áreas de baja pendiente asociadas a la quebrada El Matadero y La Causala.	37,29	8,68	5,07
Mazo, Los Vásquez	La totalidad del polígono se ubica en amenaza baja.	0,00	0,00	0,00
Corazón El Morro	Casi la totalidad del polígono se encuentra en amenaza alta y media, excepto algunos sectores asociados a las zonas de	1,59	0,45	0,44

Área Suburbana	Ubicación	Alta (ha)	Media (ha)	Baja (ha)
	menor pendiente del sector central y occidental de las laderas de la quebrada Ana Diaz.			
Aldea	La amenaza alta y media se ubica en el sector norte y oriente del polígono, asociada a las laderas de las quebradas El Matadero, Agua Bendita y La Causala; en el sector centro sur del polígono, asociado a las laderas de las quebrada Agua Bendita, La Frisola y La Causala y sobre el sector norte del polígono, sobre la vertiente sur de la quebrada El Matadero y vertiente norte de la quebrada Agua Bendita. La amenaza baja se ubica en laderas de la vertiente sur de la quebrada El Matadero y vertiente norte de la quebrada La Frisola y sectores relacionados a la conexión Aburra Cauca.	34,79	7,94	22,78
Palmitas Central	Casi la totalidad del polígono se ubica en amenaza alta y media, excepto del sector nororiental del polígono, sobre la parte alta de los afluentes de la quebrada El Cementerio; zonas de menor pendiente del área urbanizada localizados hacia el centro occidente del polígono.	1,59	0,12	0,30
Potrerito	La amenaza alta y media se ubican al norte del polígono, relacionas de las laderas de la quebrada Barba Azul; al occidente, centro y sur del polígono a las laderas de los afluentes de la quebrada La Cañadita y al oriente del polígono a las áreas de mayor pendiente de la quebrada La Chorrera una pequeña área en el extremo nororiental del polígono. La amenaza baja está asociada a las áreas de menor pendiente de la parte alta de la quebrada Barba Azul y La Chorrera; en el sector suroccidental del polígono, sobre las áreas de menor pendiente de un afluente de la quebrada La Cañadita	0,01	0,00	0,11
La Loma	Casi la totalidad del polígono se ubica en amenaza alta y media, excepto pequeñas áreas ubicadas en el sector central y norte del polígono a.	0,13	0,00	0,00
El Llano – San Cristóbal	Las amenaza alta y media se ubican en el sector nororiental del polígono, asociado a las laderas de las quebradas La Puerta y Montañita; en el sector oriental y sur del polígono asociada a las laderas de la quebrada La Puerta y La Bolsa y en los sectores occidental y suroccidental asociado a la vertiente oriental de la quebrada La Iguaná, laderas de la	1,61	0,33	13,83

Área Suburbana	Ubicación	Alta (ha)	Media (ha)	Baja (ha)
	quebrada El Llano y laderas de la vertiente norte de la quebrada La Puerta. La amenaza baja se ubica sobre el sector norte y centro-oriental del polígono, asociada a zonas de menor pendiente de la quebrada La Puerta, La Bolsa y el caño El Llano.			
Mirador del Poblado	Casi la totalidad del polígono se encuentra en amenaza baja, sector occidental del polígono en las laderas de las quebrada Yerbabuena 2; sector sur, suroriental y oriental del polígono asociado a las laderas de las quebradas La Cuenca 2, La Cuenca, Cuenca 1 y La Poblada.	0,60	0,55	76,40
El Plan	La amenaza alta y media se ubica en con mayor representación hacia occidente y suroccidente del polígono, teniendo como límite oriental la quebrada La Espadera 2 y como límite occidental la parte alta de las quebradas La Presidenta y Sanín; en el sector sur del polígono, sobre las laderas de la vertiente oriental de la zona alta de la quebrada La Espadera 1; sobre el sector oriental del polígono en el área de mayor pendiente de la vertiente nororiental de la quebrada La Espadera; y en el sector norte en las laderas de mayor pendientes pertenecientes al escarpe. La amenaza baja corresponde a la zona central, sur, oriental y norte del polígono, asociada a las zonas de pendiente baja del altiplano.	13,63	8,36	161,86

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Otra de las categorías de desarrollo restringido del suelo suburbano corresponde con los centros poblados, los polígonos que presentan más del 70% de su jurisdicción en las categorías de amenaza alta y media por movimientos en masa corresponden con Corazón El Morro, Urquitá, San José del Manzanillo, La Loma y Palmitas Central. Por su parte, los centros poblados que presentan áreas de amenaza alta y media entre el 30 y 70% son Aguas Frías, San Pablo, Buga Patio Bonito, El Llano, La Florida, La Palma, Pajarito y Pedregal Alto. Los demás centros poblados presentan áreas inferiores al 30% en estas categorías de amenaza.

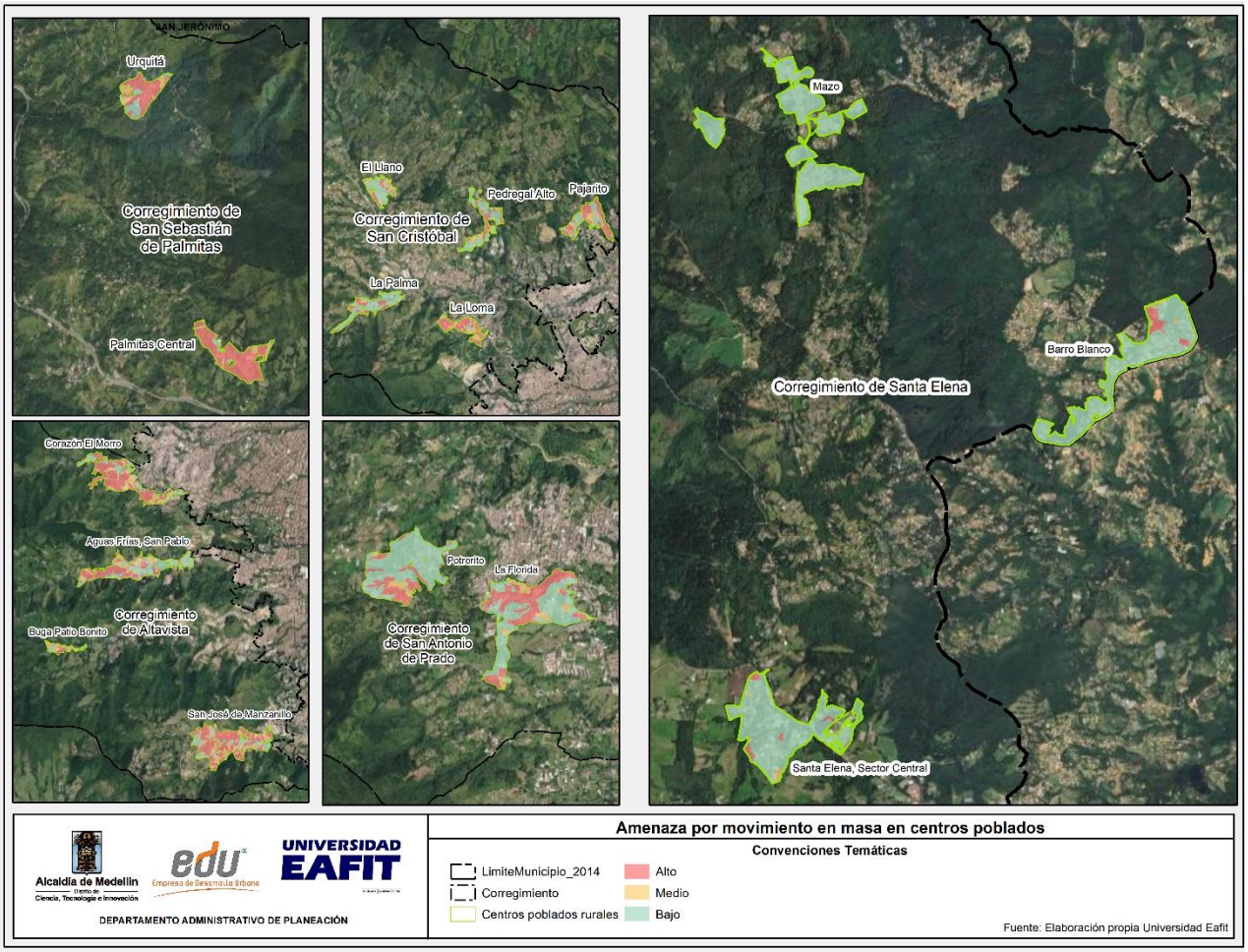


Ilustración 296. Amenaza por movimiento en masa en centros poblados del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

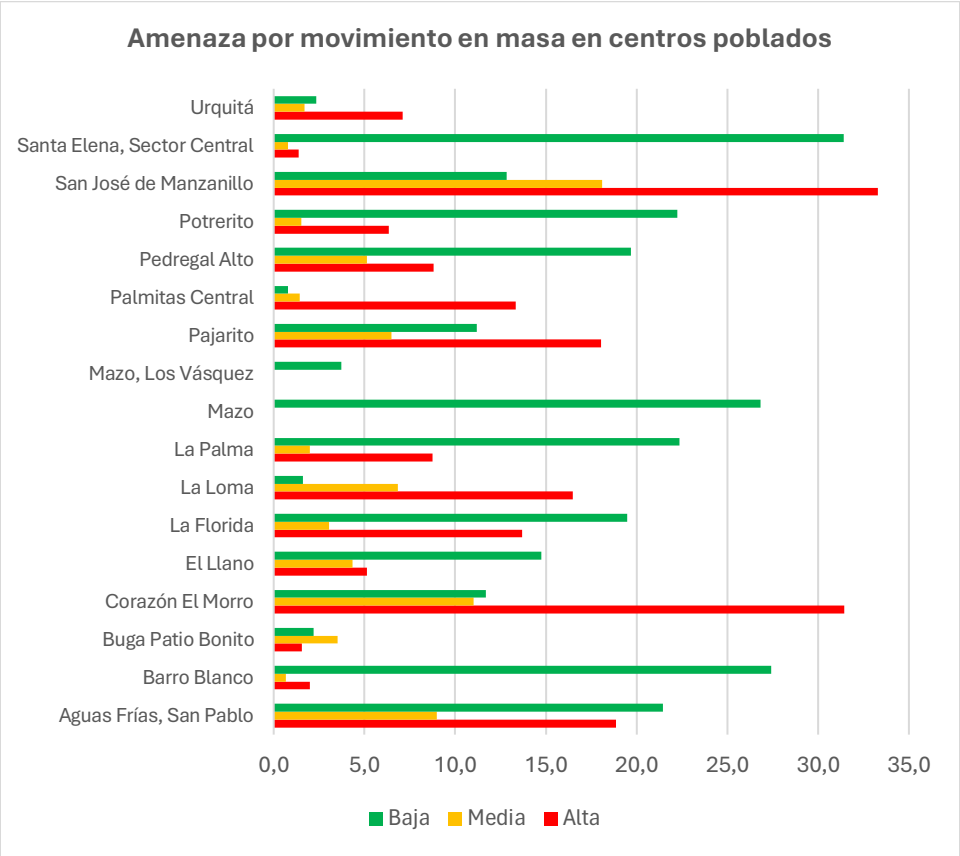


Ilustración 297. Distribución de amenaza por movimientos en masa por cada uno de los centros poblados del Distrito

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 98. Áreas de amenaza por movimiento en masa en centros poblados del Distrito de Medellín

Corregimiento	Centro Poblado	Amenaza alta Área (ha)	Amenaza media Área (ha)	Amenaza baja Área (ha)
Altavista	Corazón El Morro	31,44	11,00	11,70
	Aguas Frías, San Pablo	18,87	8,99	21,45
	San José del Manzanillo	33,28	18,11	12,85
	Buga Patio Bonito	1,55	3,52	2,19
San Sebastián de Palmitas	Palmitas central	13,34	1,44	0,78
	Urquitá	7,12	1,69	2,35
San Antonio de Prado	Potrerito	6,34	1,51	22,25
	La Florida	13,69	3,06	19,47
San Cristóbal	La Palma	8,75	2,01	22,35
	El Llano	5,13	4,35	14,75
	Pedregal Alto	8,80	5,13	19,69
	Pajarito	18,04	6,49	11,18
	La Loma	16,49	6,84	1,62
Santa Elena	Santa Elena, sector central	1,36	0,77	31,42

Corregimiento	Centro Poblado	Amenaza alta Área (ha)	Amenaza media Área (ha)	Amenaza baja Área (ha)
	Barro Blanco	2,00	0,67	27,41
	Mazo, Los Vasquez	0,00	0,00	3,74
	Mazo	0,00	0,00	26,82

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

Los centros poblados con mayor área de amenaza alta por movimiento en masa son San José del Manzanillo y Corazón El Morro con 33,28 ha y 31,44 ha respectivamente.

11.3 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA DEL SUELO URBANO

En la Tabla 99 se presentan la descripción de la ubicación de las categorías alta, media y baja de amenaza por movimiento en masa para cada uno de los polígonos definidos en el POT como suelo urbano del Distrito de Medellín (Ilustración 298).

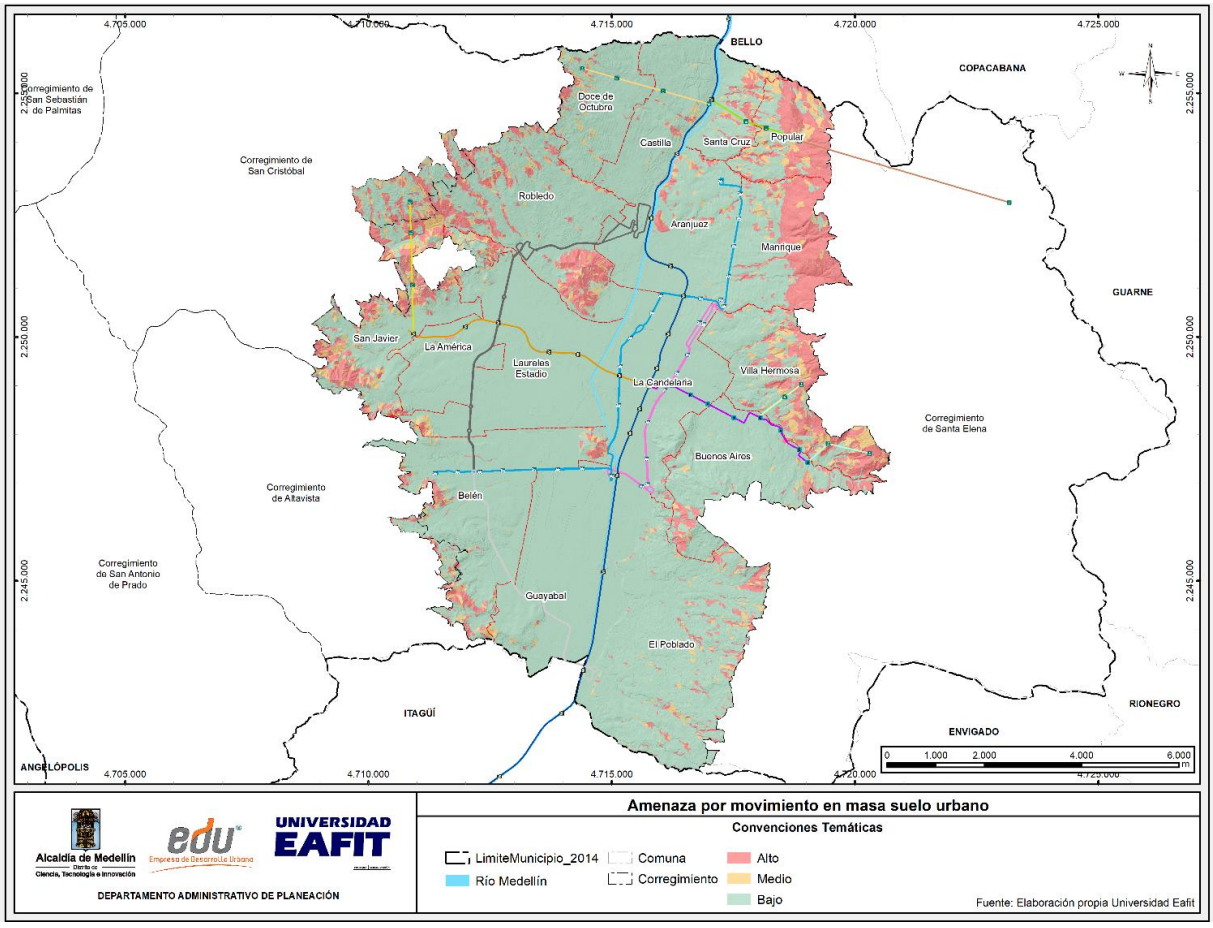


Ilustración 298. Amenaza por movimientos en masa del suelo urbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

La comuna 1 Popular es la que mayor área presenta en las categorías de amenaza alta y media con un 67,48%, seguida en orden por las comunas 3 Manrique, 8 Villa Hermosa, San Javier 13, Robledo 7 y Santa Cruz 2 que presentan áreas porcentuales de 52,54%, 47,86%, 36,31%, 30,43% y 26,02% respectivamente y las comunas las comunas 4 Aranjuez, 5 Castilla, 6 Doce de Octubre, 9 Buenos Aires, 10 La Candelaria, 11 Laureles Estadio, 12 La América, 14 El Poblado, 15 Guayabal y 16 Belén presenta áreas inferiores al 12% en estas dos categorías (Ilustración 299).

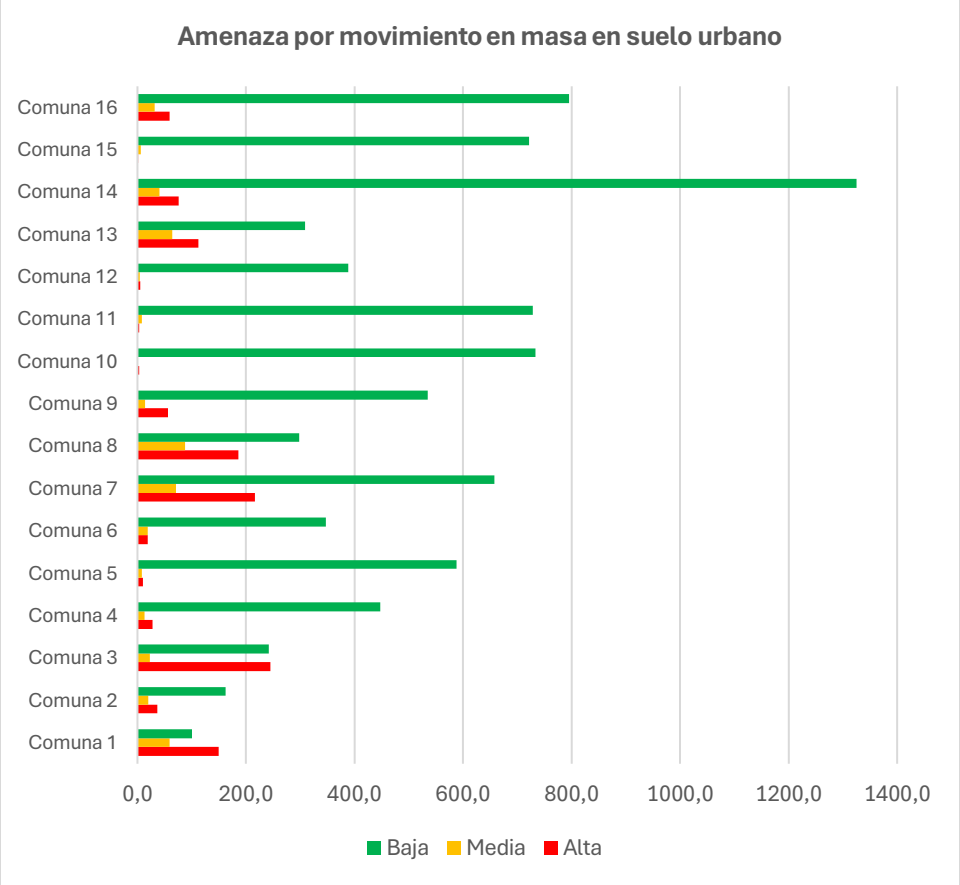


Ilustración 299. Distribución de la amenaza por movimientos en masa del suelo urbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 99. Áreas de amenaza por movimientos en masa del suelo urbano del Distrito de Medellín

Área Urbana - Comuna	Localización de la amenaza	Alta (ha)	Media (ha)	Baja(ha)
Comuna 1- Popular	La amenaza alta y media está localizada sobre el sector norte, centro y oriente de la comuna y en el sector occidental sobre las laderas de las quebradas El Burro, La Rosa, Carevieja, Aguacatillo, El Zancudo, Cañaveral, Caño Popular, Seca 1y Granizal.	150,06	58,98	100,76

Área Urbana - Comuna	Localización de la amenaza	Alta (ha)	Media (ha)	Baja(ha)
	Estas categorías tienen mayor representación en los barrios La Avanzada, Carpinelo, La Esperanza No 2 y El Compromiso. La amenaza baja se presenta distribuida sin una tendencia específica sobre la zona central, occidental y sur de la comuna.			
Comuna 2- Santa Cruz	La amenaza alta y media se ubica sobre el sector norte, oriente, sur y suroriente de la comuna, asociados principalmente a las laderas de los drenajes: Caño Popular, La Frontera, quebrada El Míster, El Burro, La Francia, La Blanquizala, Santa Ana 1 y 2, Granizal (Herrera), Granizal 1, Juan Bobo, Villa del Socorro, Santa Cruz y La Rosa (Moscú). La amenaza baja ubica en el sector norte, occidental y sur de la comuna, con una tendencia hacia los barrios Playón de los Comuneros, La Frontera, Andalucia, Villa Niza, Villa del Socorro, Santa Cruz, La Rosa y Moscú No1.	36,75	20,37	162,44
Comuna 3 - Manrique	La amenaza alta corresponde a la casi la totalidad de los barrios Versalles No2, La Cruz, San José de la Cima No 1 y No 2; en el sector oriental se ubica en los barrios Las Granjas, Santa Inés, El Raizal, Versalles No1 y La Salle y sobre las laderas de la quebrada La Chorrera. En amenaza media y alta se localiza el sector central y occidental de la comuna y las laderas de las quebradas Cañaveral, La Bermejala, La Mansión, La Honda y El Ahorcado. La amenaza media se ubica en el sector centro occidental y norte del barrio María Cano Carambolas y el sector sur oeste y noreste del barrio Oriente. La amenaza baja se ubica en el sector occidental de la comuna, cubriendo áreas de los barrios La Salle San José, Las Granjas, Campo Valdez No 2, Santa Inés, El Raizal, El Pomar, Manrique Central No2 y Manrique Oriental.	244,80	22,93	241,89
Comuna 4 - Aranjuez	La amenaza alta y media se encuentra ubicada al norte y centro de la comuna, sobre los barrios Palermo, San Isidro, Berlín, La Piñuela, Las esmeraldas, Aranjuez, Bermejal Los Álamos, Miranda y Moravia, asociados principalmente a las laderas de las quebradas La Rosa (Moscú), El Aguacate,	28,17	12,75	447,41

Área Urbana - Comuna	Localización de la amenaza	Alta (ha)	Media (ha)	Baja(ha)
	La Herradura, La Piñuela y La Bermejala. Así mismo, áreas al norte de los barrios Miranda y Brasilia sobre la quebrada La Bermejala. En el extremo sur este de la comuna, en el barrio Manrique Central No1, asociado a las laderas de la quebrada La Honda y el Ahorcado. La amenaza baja se encuentra de manera extensa a lo largo de la comuna, cubriendo en su totalidad los barrios Universidad de Antioquia, Parque Norte, Jardín Botánico, Sevilla, San Pedro y Campo Valdez No1; de manera parcial los barrios Palermo, San Isidro, Berlín, La Piñuela, Las Esmeraldas, Aranjuez, Bermejal Los Álamos, Miranda y Moravia			
Comuna 5 - Castilla	La amenaza alta está localizada sobre el sector norte de la comuna, relacionada a las laderas de la quebrada La Madera; sectores orientales de las quebradas Culebra y La Feria. En la parte central de la comuna en los barrios Plaza de Ferias, Belalcazar y Tricentenario, asociado principalmente a las laderas de las quebradas Héctor Abad Gómez, Tinajas, La Potrera; Además de sectores aislados en las laderas de las quebradas Minitas, La Cantera y La Quintana. La amenaza media está localizada sobre las laderas de las quebradas Culebra y La Feria. En la parte central de la comuna, se encuentran sobre las laderas de las quebradas Tinajas, La Potrera, La Rosa y La Velázquez de los barrios en los barrios Plaza de Ferias, Belalcázar y Tricentenario, además de sectores aislados en las laderas de la quebrada La Quintana. La amenaza baja es la de mayor representación y se presenta a lo largo de los sectores norte, occidente y sur de la comuna, cubriendo en su totalidad los barrios Castilla, Oleoducto, Terminal de Transporte, Cementerio Universal, El Progreso y Caribe.	10,34	8,10	587,96
Comuna 6 – 12 de Octubre	La zona de amenaza alta y media se ubica al norte, occidente y suroccidente de la comuna, en sectores de los barrios Santander, 12 de octubre No 1, Progreso No 2, El Triunfo, 12 de Octubre No2, Mirador del 12, Picacho, Picachito, San Martin de Porres y sobre las laderas de las quebradas La Madera, Tinajas, La Velásquez, La Potrera, La	19,16	18,83	346,99

Área Urbana - Comuna	Localización de la amenaza	Alta (ha)	Media (ha)	Baja(ha)
	Esperanza, La Cantera, La Cantera ramal sur, Minitas y la Quintana. La amenaza baja es la de mayor representación en la comuna y se extiende a lo largo del sector nororiental, oriental, centro y sur de la misma.			
Comuna 7 - Robledo	La amenaza alta y media se identifican en el sector sur oriental de la comuna en los barrios Cerro El Volador, San Germán, Ecoparque Cerro El Volador y Nueva Villa de la Iguaná; en el extremo occidental los Barrio Santa Margarita, Olaya Herrera, Fuente Clara y al occidente del barrio Cucaracho; en las laderas de las quebrada Mariela, La Puerta, La Corcovada, La Gómez, Robledales, Sauces, Sauces 1, La Moñonga y La Iguaná. En el sector norte de comuna en las laderas de las quebradas Malpaso, La Batea, La Quintana y La Cantera ramal sur correspondiente a los barrios Pajarito, Aures No2, Aures No1 y Montercarlo. En el sector sur de la comuna se identifica al occidente y centro del barrio Robledo. La amenaza baja se ubica en sector central y oriental de la comuna, con mayor representación en los barrios Córdoba, Altamira, Bosques de San Pablo, Pilarica, López de Mesa, El Diamante, Bello horizonte, Villa Flora, Palenque, Facultad de Minas y San Germán.	216,78	71,12	658,13
Comuna 8 – Villa Hermosa	Las amenazas alta y media se ubican en el sector nororiental, oriental y suroriental de la comuna, cubriendo la totalidad de los barrios Llanaditas, Villa Turbay, La Sierra y La Libertad; en las laderas de las quebradas El Ahorcado, Los Ataúdes, La Loca, La Aguadita, La Aguadita 1, Chorro Hondo, La Rafita, La Arenera, La Loquita, Santa Elena, La Gallinaza, San Antonio, La Castro, La Mica, El Sapero, El Ñato, Ma Meditadora y cañada La Granja. La amenaza baja se ubica sobre el sector noroccidental (Barrio La Ladera), occidente (Barrio Enciso y Sucre) y pequeños sectores al sur (Las Estancas y Villa Lilian) y suroriente (Barrio Villa Tina) de la comuna.	186,31	87,30	298,09
Comuna 9 – Buenos Aires	La amenaza alta y media se ubica en el extremo oriental de la comuna, limitado por las laderas de las quebradas Mediagua, La Salada, La Granja, El Carbonero, el Aserradero, La Pastora, Los Cauces y Santa Elena, correspondiente a los barrios 8 de Marzo, Juan Pablo II y	56,55	13,74	534,98

Área Urbana - Comuna	Localización de la amenaza	Alta (ha)	Media (ha)	Baja(ha)
	Barrios de Jesús. Al norte sobre la quebrada Santa Elena y sobre las laderas de las quebradas La Pastora, El Aserradero, El Carbonero, Santa Elena, La India y la Mediagua; polígonos aislados dentro del barrio Alejandro Echavarría, los Cerros –El Vergel, Bombona No2, Miraflores, Cataluña y Loreto. En el extremo occidental y suroccidental asociado a las laderas de las quebradas Loreto, El Indio, El Encanto, La Asomadera, La Asomadera ramal 2, La Asomadera 1, El Seminario, La Loma, La Yerbalit y Yerbabuenal 2 en los barrios Asomadera No1, No2 y No3. La amenaza baja se encuentra sobre el sector centro (barrios Miraflores, La Milagrosa, Los Ceros-El Vergel, Gerona, Loreto, Cataluña y Bombona No2), norte (Barrios Caicedo y Alejandro Echavarría), occidente (El Salvador y Asomadera No1) y en el extremo sur (Asomadera No 2 y No3) de la comuna.			
Comuna 10 – La Candelaria	La amenaza alta y media está localizada al suroccidente de la comuna en los barrios Las Palmas y San Diego; sobre las laderas de las quebradas San Diego, El Seminario, El Indio y Santa Elena en el sector del barrio Boston. La amenaza baja es la de mayor representación en la comuna y se encuentra a lo largo de los barrios El Chagualo, Jesús Nazareno, San Vicente de Paul, Prado, San Benito, Estación Villa, Villa Nueva, La Candelaria, Guayaquil, Corazón de Jesús, La Alpujarra, Centro Administrativo, Colón, Calle Nueva, Bombona No1, Perpetuo Socorro, Las Palmas y San Diego.	2,92	0,08	733,08
Comuna 11 - Laureles	Las amenazas medias y alta se ubican en el extremo suroccidental, extremo occidental del barrio La Castellana, asociado a las partes altas del Caño El Noral y los drenajes de la parte alta de la quebrada La Matea. Al norte sobre la quebrada La Iguana, en inmediaciones de los barrios Los Colores y Cuarta Brigada. La amenaza baja es la de mayor extensión cubriendo en su totalidad los barrios Carlos E Restrepo, Batallón Cuarta Brigada, Cuarta Brigada, Estadio, Unidad Deportiva Atanasio Girardot, Suramericana, Naranjal, Florida Nueva, El Velódromo, Lorena, Las Acacias, Laureles, Bolivariana, La UPB, Los Conquistadores y San Joaquín	3,54	7,97	728,75

Área Urbana - Comuna	Localización de la amenaza	Alta (ha)	Media (ha)	Baja(ha)
Comuna 12 – La América	La amenaza alta y media se ubica en el extremo norte de la comuna, en el barrio Ferrini y Calasanz parte alta; sector centro occidental de la comuna en los barrios Campo Alegre, El Danubio y La Floresta asociada a las quebradas La Hueso y Zanjón Santa Mónica; en el extremo suroeste de la comuna en el barrio Santa Teresita, asociadas a las laderas de la parte alta de la quebrada La Matea; En el sector sur de la comuna sobre el extremo suroccidental del barrio La Castellana y las laderas del caño El Noral. La amenaza baja se encuentra a lo largo de la comuna, siendo la categoría de mayor representación cubriendo la totalidad los barrios Calasanz, Santa Lucia, La América, Los Pinos, Santa Mónica, Barrio Cristóbal y Simón Bolívar.	5,05	4,11	388,16
Comuna 13 – San Javier	La amenaza alta y media se ubica en el sector norte de la comuna, en los barrios El Pesebre, sector sur del barrio Blanquizal, Juan 23, La Quiebra, Metropolitano y Santa Rosa de Lima, sector norte del barrio La Pradera, norte y noroeste del barrio El Socorro; en el sector occidental y suroccidental de la comuna en los barrios Antonio Nariño, Eduardo Santos, El Salado, Nuevos Conquistadores, Las Independencias, 20 de Julio y El Corazón; y en el sector sur de la comuna en el Barrio Betania. La amenaza baja se extiende a lo lardo del sector oriental de la comuna cubriendo sectores de los barrios Santa Rosa de Lima, Los Alcaceres, La Pradera, San Javier No 1 y No 2, 20 de Julio y Belencito. Al sur de la comuna sobre el sector norte del barrio Betania y al occidente de la comuna sobre los barrios Eduardo Santos, El Salado y Antonio Nariño.	112,38	63,69	308,85
Comuna 14 – El Poblado	Las amenazas media y alta se ubican en el sector norte en el barrio Castropol en límites con los barrios Villa Carlota y Lalinde, asociado principalmente a las laderas de las quebradas La Asomadera, La Asomadera 1, Paraíso, Paraíso 2, La Lomita y Castropol. En el sector oriental de la comuna están asociadas a las laderas de las quebradas: Yerbabuena, Yerbabuena 2, Yerbalit, La Concha, La Poblada, La Cuenca, La Chacona, La Presidenta, Sanín, Sanín 1, El Chambul (El Chocho), El Chocho 1, La Escopetería, El Sagrado Corazón, La Escopetería 2, Escopetería 1, Caño Los Ángeles, La Marucha, La Volcana, La Volcana 1, San Juan, La Sucia, La Aguacatala, La Paulita, Los Mangos, caño Montesori, La Zuñiga, San Michel,	76,32	40,28	1324,83

Área Urbana - Comuna	Localización de la amenaza	Alta (ha)	Media (ha)	Baja(ha)
	cubriendo los barrios Altos del Poblado, Las Lomas No1 y No2, El Tesoro, La Florida, Los Naranjos, Balsos No1 y San Lucas. En el sector suroccidental de la comuna en la parte central del barrio Santa María de los Ángeles. En el sector central de la comuna, en los barrios La Alejandría y Balsos No 2 sobre las laderas de las quebradas La Sucia, La Volcana y Los Balsos y en el barrio El Castillo sobre las laderas de las quebradas El Castillo y La Aguacatala. En el sector sur de la comuna en el barrio el Diamante No2 sobre las laderas de las quebradas La Paulita, Los Mangos y Zuñiga. La amenaza baja cubre la mayor parte del área de la comuna, principalmente los barrios Colombia, Villa Carlota, Manila, Astorga, Patio Bonito, La Aguacatala, El Diamante No2, El Castillo, Los Balsos No1 y No2, Alejandría, La Florida, El Poblado, San Lucas, Lalinde, Los Naranjos, Castropol y La loma No1.			
Comuna 15 - Guayabal	La amenaza alta se ubica en el sector sur de la comuna, sobre la parte centro oriental del barrio La Colina. La amenaza media se ubica al sur de la comuna, en el límite oriental de los barrios El Rodeo y La Colina y sobre el sector sur-central y oeste del barrio la Colina. La amenaza baja cubre en su totalidad los barrios Tenche, Trinidad, Santa Fe, Parque Juan Pablo segundo, campo amor, Cristo Re y Guayabal y sectores de los barrios El Rodeo y La Colinita.	1,09	5,90	721,85
Comuna 16 - Belén	La amenaza alta y media se ubica en el sector nororiental de la comuna en el barrio Cerro Nutibara y Cerro Nutibara; al extremo noroccidental del barrio Las Mercedes; sector occidental del barrio Las Violetas, extremo suroeste del barrio Los Alpes; sectores norte, centro y oeste del barrio Altavista; sobre las laderas de la quebrada Altavista en el sector noroeste del barrio La Gloria; sector noroccidental, occidental, sur y sureste del barrio El Rincón; sector sur oriente del barrio La Mota. En el barrio La Hondonada sobre las laderas de las quebradas La Guayabala, La Capilla, La Capillita y la Emilia, sobre las laderas del caño Panorama, en el límite entre los barrios Las Playas y Diego Echavarría. En el Barrio Loma de los Bernal en las Laderas de la quebrada Casa Diana 1, Casa Diana y caño La Mota.	58,88	31,77	794,98

Área Urbana - Comuna	Localización de la amenaza	Alta (ha)	Media (ha)	Baja(ha)
	La amenaza baja exhibe una tendencia hacia el sector oriental de la comuna, hacia los barrios Fátima, Rosales, Belén, El Nogal - Los Almendros, Miravalle, Nueva Villa del Aburrá, Las Mercedes, Las Violetas, La Palma, Granada, San Bernardo, Las layas, Diego Echavarría, La Mota, Belén Rincón, La Loma de Los Bernal y La Gloria.			
Cabecera San Cristóbal (60)	La amenaza alta y media cubre casi la totalidad del área ubicada en el sector sur de la quebrada La Iguaná, comprendido entre las quebradas La Potrera y La Quiebra 2; otro sector se ubica en el extremo noroccidental de la cabecera, sobre las laderas de las quebradas caño Palenque, caño Palenquera y Agua Fría; al norte de la cabecera sobre las laderas de las quebradas La Iguaná y afluentes menores, además las laderas de las quebradas Casa Bella, La Ronda, La Bermejala, Pedregal y La Chaguala. La amenaza baja, está asociada a las zonas de menor pendiente y llanuras aluviales y aluviotorrenciales de la quebrada La Iguaná.	234,62	91,21	232,95
Cabecera Altavista (70)	La amenaza alta y media está localizada al sur y suroccidente de la cabecera, sobre la ladera occidental y oriental de las quebradas Los Pinos, y Altavista y la ladera sur de la quebrada Buga. En el sector oriental de la cabecera se ubican en las laderas de la quebrada La Guacharaca y en el extremo oriental de la cabecera corresponde al área que limita con la cabecera urbana del Distrito. Al norte de la cabecera se localiza en ambas laderas de la quebrada La Cañadita y todas las laderas que se encuentran entre el caño Manzanares (occidente) y el caño El Concejo (oriente). La amenaza baja está asociada a la llanura aluvial y aluviotorrencial de las quebradas Altavista y La Buga.	19,24	14,59	60,97
Cabecera San Antonio de Prado (80)	La amenaza alta y media se ubica sobre el sector norte sobre las laderas de las quebradas Barba Azul, caño Naranjito, Caño La Oculta, drenajes que hacen parte de la quebrada Doña María, caño Horizontes, caño Pradito, quebrada La Cañada, Quebrada El Buey. Sobre el sector central de la cabecera, en las laderas de las quebradas El Buey y La Manguala; En el sector occidental de la cabecera sobre las laderas de las quebradas La Chorrera y caño	47,36	17,90	333,82

Área Urbana - Comuna	Localización de la amenaza	Alta (ha)	Media (ha)	Baja(ha)
	Naranjito y quebrada Barba Azul; Sobre el sector sur de la cabecera, en las laderas de las quebradas La Cabuyala, La Mauala, La Limona y afluentes. La amenaza baja se encuentra principalmente sobre el sector norte de la cabecera, entre las quebradas La Manguala, El Buey y los drenajes de la ladera sur de la quebrada Doña María. En el sector central, oriental y sur de la cabecera, se ubica entre las quebradas La Manguala y La Limona y en el extremo suroeste de la cabecera se localiza entre la quebrada La Limona y el límite municipal.			

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

11.4 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA DEL SUELO DE EXPANSIÓN

En la Tabla 100 se presentan la descripción de la ubicación de las categorías alta, media y baja de amenaza por movimiento en masa para cada uno de los polígonos definidos en el POT como suelo de expansión del Distrito de Medellín (Ilustración 300).

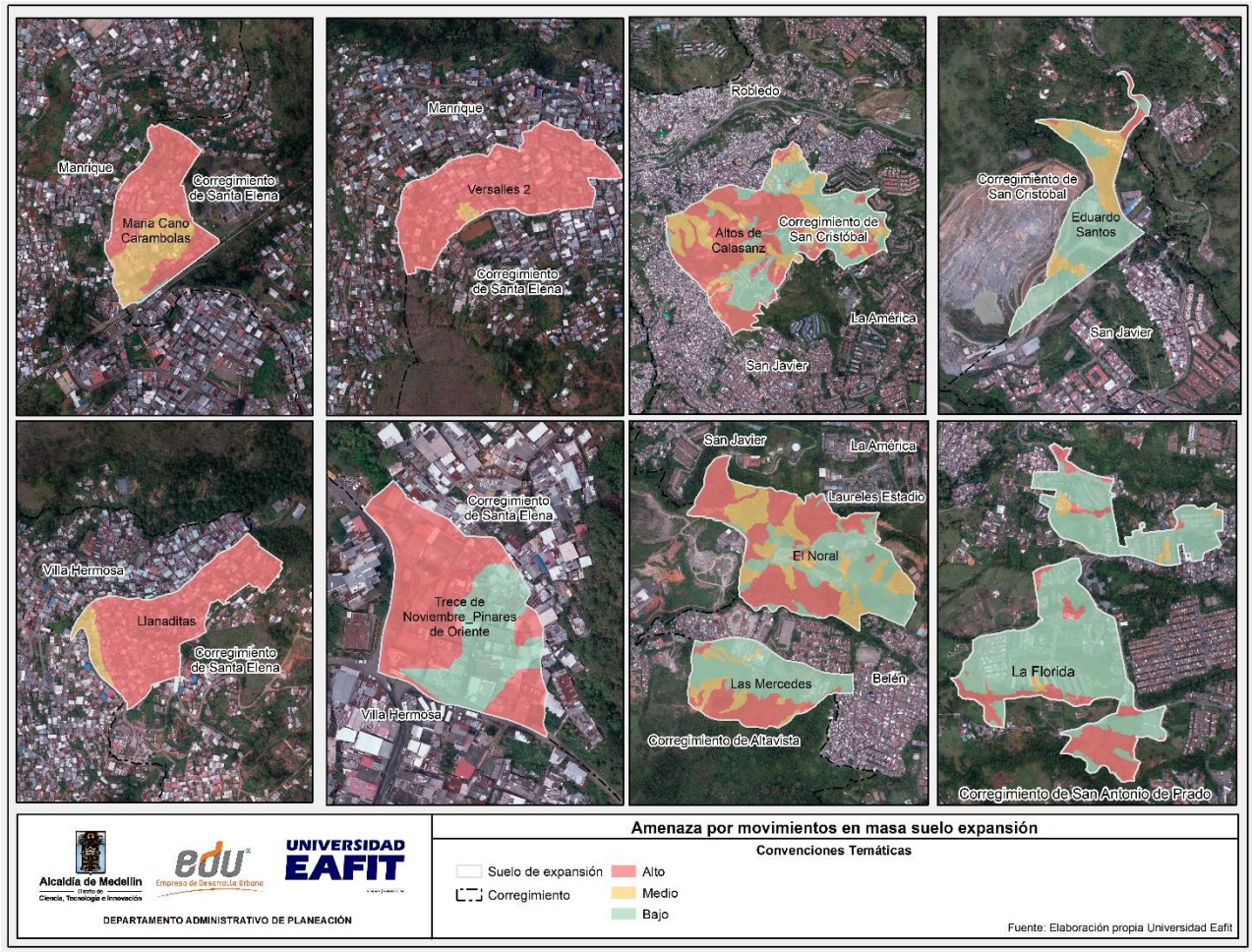


Ilustración 300. Amenaza por movimientos en masa en el suelo de expansión del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Los polígonos de Llanaditas, Maria Cano Carambolas y Versalles 2 tienen casi la totalidad de su territorio en amenaza alta y media; los polígonos Alto de Calazans, Trece de Noviembre y El Noral poseen el 66,47%, 64,83 % y 64,68% de su territorio en las categorías de amenaza alta y media; los polígonos Las Mercedes y Eduardo Santos tienen porcentajes correspondientes al 40,80 % y 33,60 % en estas categorías y el polígono de La Florida es el que menor área tiene en estas categorías con el 20 % (*Ilustración 301*).

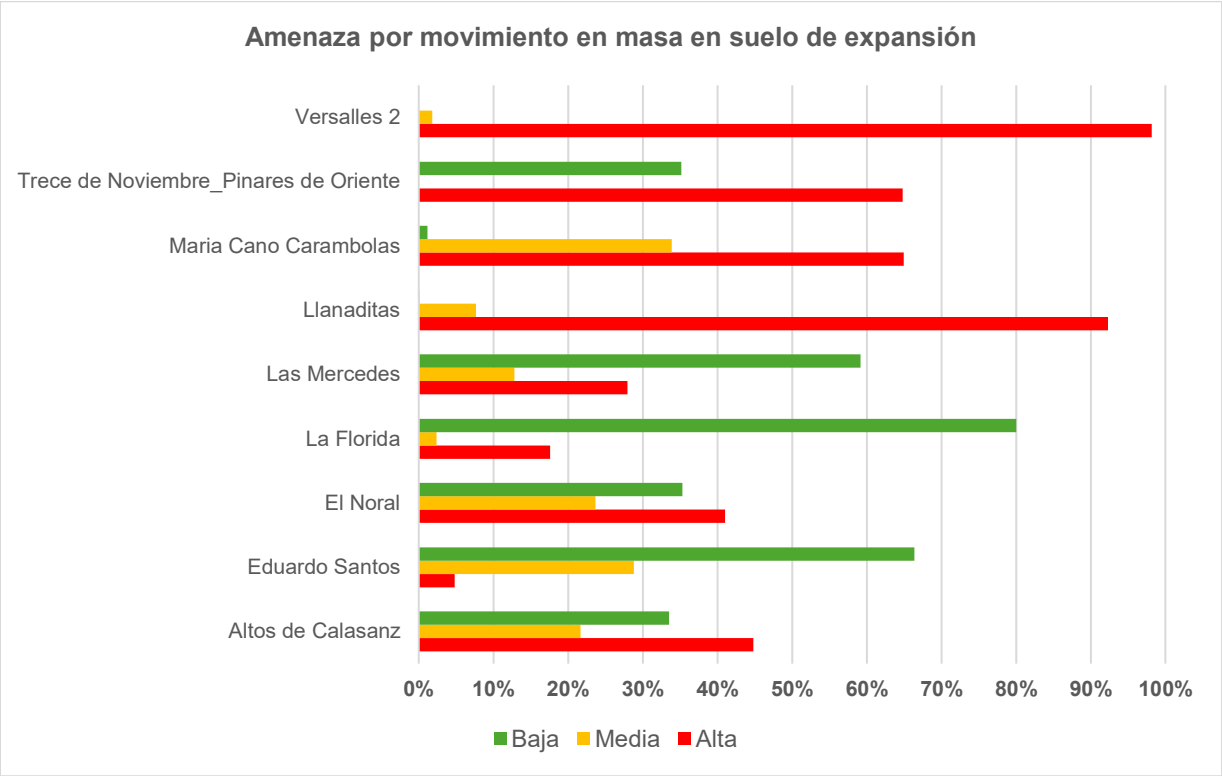


Ilustración 301. Distribución de la amenaza por movimientos en masa del suelo de expansión del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 100. Áreas de amenaza por movimientos en masa del suelo de expansión del Distrito de Medellín

Área Expansión	Localización	Alta (ha)	Media (ha)	Baja (ha)
Las Mercedes	Las zonas de amenaza alta y media se ubican en el sector oriental y sur del polígono relacionadas a la vertiente sur y occidental del caño Las Violetas; en el sector occidental del polígono asociada a las laderas de la parte alta de la vertiente oriental de la quebrada La Picacha y en el sector norte del polígono asociado a los llenos antrópicos sonde se ubica la cantera y la terminal de buses. La amenaza baja se localiza sobre la vertiente norte del caño Las violetas, hasta el límite norte del polígono.	4,42	2,03	9,35
El Noral	La amenaza alta y media se ubican en el sector sur del polígono relacionada a la vertiente norte de la quebrada La Picacha; al occidente del polígono corresponde a la vertiente oriental del caño Las Margaritas y las laderas de las quebradas Betania 1 y la Matea; en el sector norte del polígono corresponde a las laderas del caño	13,18	7,60	11,34

Área Expansión	Localización	Alta (ha)	Media (ha)	Baja (ha)
	El Noral y los afluentes de la quebrada La Matea; en el sector central y oriental del polígono asociado a la vertiente sur del caño El Noral. La amenaza baja se ubica sobre el sector central y oriental del polígono, relacionado a un área de infraestructura y explotación minera.			
La Florida	La mayor parte del polígono se encuentra en amenaza baja, excepto las laderas de los afluentes de la quebrada La Manguala que atraviesan el polígono en el sector norte; las laderas de los afluentes de la quebrada La Cabuyala que atraviesan el polígono en el sector central; en el sector sur corresponde a los ambos flancos de la quebrada La Maula; y las laderas de los afluentes de la quebrada La Limona que atraviesan el polígono.	6,77	0,92	30,76
Eduardo Santos	La amenaza alta y media se ubican al norte del polígono sobre las laderas de las quebradas La Leonarda y La Leonarda 1; sector central del polígono en las laderas de la quebrada La Leonarda 2; y al sur y suroccidente del polígono, sobre las laderas de la quebrada Las Hueso 1 y Hueso2. La amenaza baja se encuentra principalmente sobre el sector central del polígono, entre las quebradas La Leonarda 2 y La Hueso 1; y en el extremo suroeste relacionada a intervenciones antrópicas de explotaciones mineras.	0,25	1,47	3,39
Altos de Calasanz	Las zonas de amenaza alta y media se localizan al occidente del polígono entre las quebradas La Mina y La Mina1; en el sector sur del polígono donde se encuentran los principales afluentes de la vertiente occidental de la quebrada La Mina; en el sector central del polígono entre la quebrada La Mina y Cañada Honda; sector Oriental del polígono, en las laderas de los afluentes de la parte alta de la quebrada El coco Y al norte del polígono, las laderas del caño Torres de Olaya y parte alta de los afluentes que desembocan en la quebrada La Iguaná. Las zonas de amenaza baja se localizan al norte, oriente y centro del polígono, relacionadas a las zonas urbanizadas consolidadas.	32,65	15,81	24,44

Área Expansión	Localización	Alta (ha)	Media (ha)	Baja (ha)
María Cano Carambolas	El polígono presenta predominantemente amenaza alta, sin embargo, hacia el sur del polígono la amenaza media es representativa.	1,79	0,93	0,03
Versalles No 2	Casi la totalidad del polígono se encuentra en la categoría de amenaza alta.	3,39	0,06	0,00
Llanaditas	Casi la totalidad del polígono se encuentra en la categoría de amenaza alta.	3,78	0,32	0,00
Trece de Noviembre_Pinares de Oriente	El polígono presenta principalmente la categoría de amenaza alta hacia los costados oriental y occidental, hacia el centro del polígono predomina la amenaza baja.	0,40	0,00	0,22

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

12 ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA

Las Áreas con Condición de Amenaza (ACA), son las zonas o áreas del territorio municipal zonificadas como de amenaza alta y media en las que se establezca en la revisión o expedición de un nuevo POT la necesidad de clasificarlas como suelo urbano, de expansión urbana, rural suburbano o centros poblados rurales para permitir su desarrollo (Decreto 1807 de 2014).

La delimitación de las zonas con condición de amenaza se llevó a cabo a partir del mapa final de amenaza por fenómeno (movimientos en masa), se realizó la intersección de las zonas de amenaza alta y media con los polígonos de zonas sin construcciones (zonas verdes) y apoyados de la ortofoto del distrito del año 2024, a este resultado se le superponen y eliminan los polígonos con estudio de detalle, zona de alto riesgo no mitigables y algunos polígonos con obras estructurales de mitigación definidas por el Departamento Administrativo de planeación (DAP) y el departamento administrativo de gestión de riesgo de desastres DAGRD. Finalmente, se depuraron los polígonos aislados que cubren un área inferior a 400 m^2 para movimientos en masa y 64 m^2 para inundaciones y avenidas torrenciales, estas áreas corresponden con la unidad mínima cartografiable definida para las escalas 1:5.000 y 1:2.000 en el distrito de acuerdo con los Estándares básicos para el manejo de información geográfica de la Alcaldía de Medellín (DAP, 2025).

Para realizar la codificación de las áreas en condición de amenaza se realiza el cruce con la clasificación del suelo y la división político-administrativa (códigos de barrios y veredas según DAP). El código se compone de una estructura alfanumérica que se compone de 5 a 6 elementos según el fenómeno:

[Fenómeno] + [clasificación del suelo] + [Tipo] + [Comuna] + [Barrio/Vereda] + [Consecutivo]

Fenómeno: Solo aplica para Inundación (**I**) y Avenida Torrencial (**T**). Si es Movimiento en Masa, este espacio queda vacío.

Clasificación del suelo: la sigla según la siguiente clasificación

UR Suelo urbano
CG Suelo urbano de cabecera corregimental (Altavista, San Antonio de Prado, San Cristóbal)

SU Suelo suburbano
EX Suelo de expansión
RR Suelo rural

Tipo: Indica que corresponde a la amenaza (**A**)

Ubicación: Códigos oficiales de comuna y barrio/vereda.

Consecutivo: Número único del polígono

Es importante resaltar que las áreas con condición de amenaza para movimiento en masa definidas en los estudios básicos de amenazas serán depuradas por el DAP para la memoria justificativa, teniendo en cuenta los suelos de protección y los cambios en los usos del suelo que apliquen para posibles desarrollos.

Las Áreas con Condición de Riesgo (ACR), corresponden a las zonas o áreas del territorio municipal clasificadas como de amenaza alta que estén urbanizadas, ocupadas o edificadas, así como en las que se encuentren elementos del sistema vial, equipamientos (salud, educación, otros) e infraestructura de servicios públicos (Decreto 1077 de 2015).

La definición de las áreas en condición de riesgo se realiza con el cruce de la amenaza en categoría alta por fenómeno y con las áreas identificadas con construcciones (Apoyados con imágenes áreas 2024 del distrito, la base catastral y eliminando los espacios verdes urbanos), a este resultado se le superponen y eliminan los polígonos con estudio de detalle, zona de alto riesgo no mitigables y algunos polígonos con obras estructurales de mitigación definidas por el Departamento Administrativo de planeación (DAP) y el departamento administrativo de gestión de riesgo de desastres DAGRD. Finalmente, se depuraron los polígonos aislados que cubren un área inferior a 400 m^2 para movimientos en masa y 64 m^2 para inundaciones y avenidas torrenciales, estas áreas corresponden con la unidad mínima cartografiable definida para las escalas 1:5.000 y 1:2.000 en el distrito de acuerdo con los Estándares básicos para el manejo de información geográfica de la Alcaldía de Medellín (DAP, 2025).

La codificación del riesgo sigue la misma lógica que la amenaza, con la diferencia de que en el **paso 3**, el tipo corresponde a Riesgo (**R**)

Las áreas con condición de amenaza y condición de riesgo se definieron para cada uno las clasificaciones del suelo (urbano, suburbano y expansión) y para el suelo rural, propiamente dicho, solo se delimitaron áreas con condición de riesgo.

12.1 ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO DEL SUELO RURAL (ACRR)

De la zonificación de áreas con condición de riesgo rural se obtuvieron 119 polígonos que cubren el 366,84 ha, estas corresponden a asentamientos rurales con un número importante de viviendas.

La codificación de cada polígono (ACRR) se realizó de acuerdo con: Prefijo RR (Riesgo Rural) + Código corregimiento (xx) + Código vereda (xxxx) + Consecutivo del polígono por vereda (xx).

En la Tabla 101 se presentan la descripción de la ubicación de las Áreas con Condición de Riesgo Rural (ACRR) por movimiento en masa (Ilustración 302).

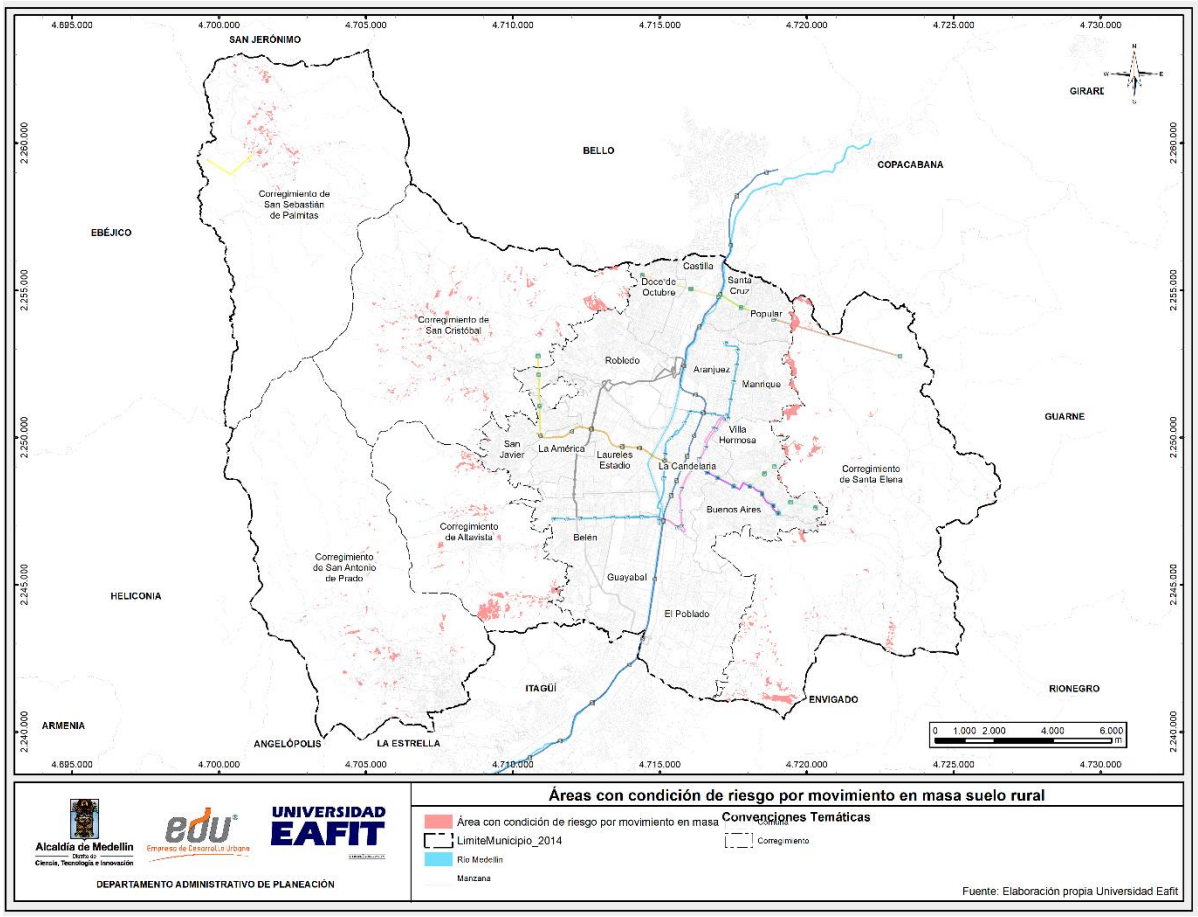


Ilustración 302. Áreas con condición de riesgo del suelo rural del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

El corregimiento de Santa Elena es el que presenta un área mayor en la categoría de ACRR por movimiento en masa, con aproximadamente 139,34 ha, seguido de San Cristóbal con 92,58 ha,

Altavista con 68,50 ha, San Sebastián de Palmitas con 29,12 ha y San Antonio de Prado con 37,29 ha áreas con condición de riesgo rural (Ilustración 303).

La zonificación de las ACRR se encuentra en la GDB anexa y la codificación de cada polígono se presentan el Anexo 10. Zonificación de ACA y ACR por MM.

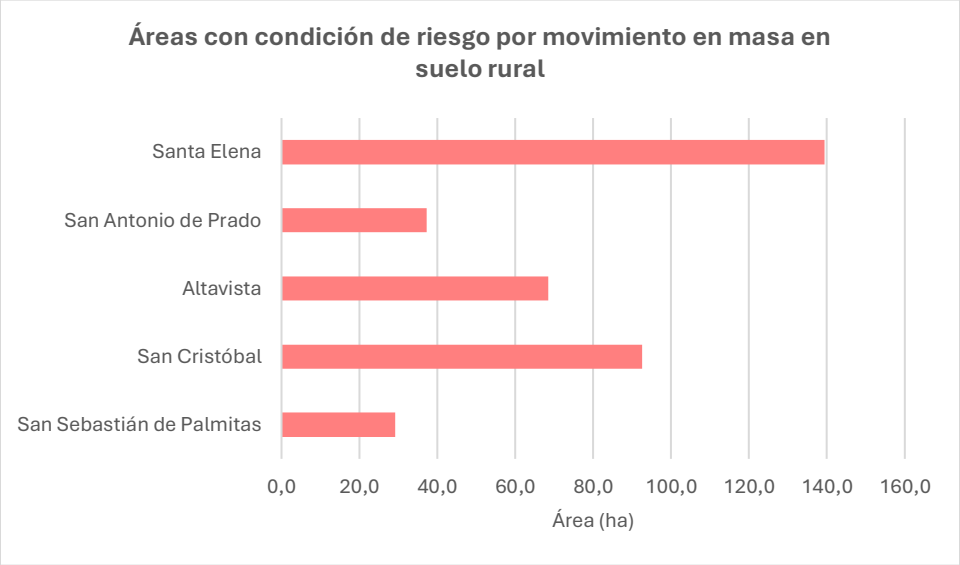


Ilustración 303. Distribución de las áreas con condición de riesgo del suelo rural del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 101. Áreas con condición de riesgo rural (ACRR) del Distrito de Medellín

Corregimiento	Ubicación	Áreas con condición de Riesgo Área (ha)
San Sebastián de Palmitas (50)	Se ubican en el sector noroccidental del corregimiento, en las veredas Urquitá, Portrera Miserenga, La Aldea y Palmitas.	29,12
San Cristóbal (60)	Se ubican en el sector Centro occidental del corregimiento, en las veredas El Llano, Travesías, El Uvito y Pedregal Alto. En el sector sureste en la vereda La Loma. En el sector Norte, en las veredas Yolombo y La Ilusión. En el sector Nororiental en las veredas Pajarito y El Picacho.	92,58
Altavista (70)	Se ubican sobre ambas laderas de la quebrada Altavista, sobre el sector central del corregimiento, en las veredas Patio Bonito, El Jardín, San José de Manzanillo y Altavista Sector Central	68,50

Corregimiento	Ubicación	Áreas con condición de Riesgo Área (ha)
San Antonio de Prado (80)	Se ubican sobre el sector central y oriental del corregimiento, en las veredas La Montañita, Potrerito y La Verde.	37,29
Santa Elena (90)	Se ubican al norte del corregimiento, sobre la ladera oriental de la vereda Piedras Blancas – Matasanos en el límite del perímetro urbano. Otras áreas se ubican al occidente y suroccidente del corregimiento en la vereda Las Palmas.	139,34

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

12.2 ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA (ACA) Y ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO (ACR) DEL SUELO SUBURBANO

De la zonificación de áreas con condición de amenaza suburbano se obtuvieron 771 polígonos que cubren 159,64 ha y de las áreas con condición de riesgo suburbano se obtuvieron 226 polígonos que cubren 46,27 ha, esta distribución incluye las categorías de desarrollo restringido relacionadas con áreas destinadas a la parcelación de vivienda campestre, áreas para la localización de equipamientos y suelos suburbanos propiamente dichos.

La codificación de cada polígono (ACA) se realizó de acuerdo con: Prefijo SUA (Suburbano Amenaza) + Código corregimiento (xx) + Código vereda (xxxx) + Consecutivo del polígono por vereda (xx).

La codificación de cada polígono (ACR) se realizó de acuerdo con: Prefijo SUR (Suburbano Riesgo) + Código corregimiento (xx) + Código vereda (xxxx) + Consecutivo del polígono por vereda (xx).

En la Tabla *102* se presentan las áreas en cada una de las condiciones por polígono suburbano (Ilustración 304 e Ilustración 305).

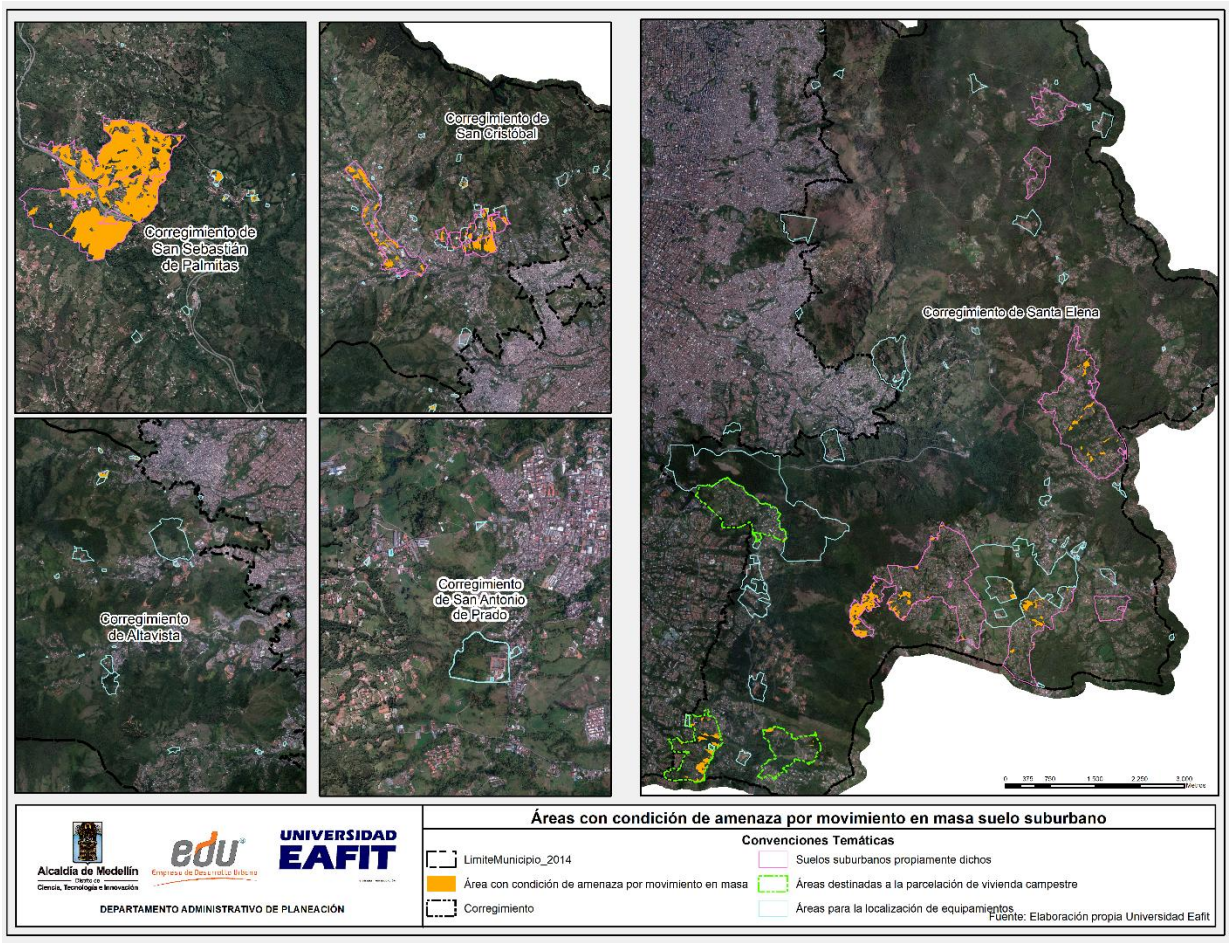


Ilustración 304. Áreas con condición de amenaza del suelo suburbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

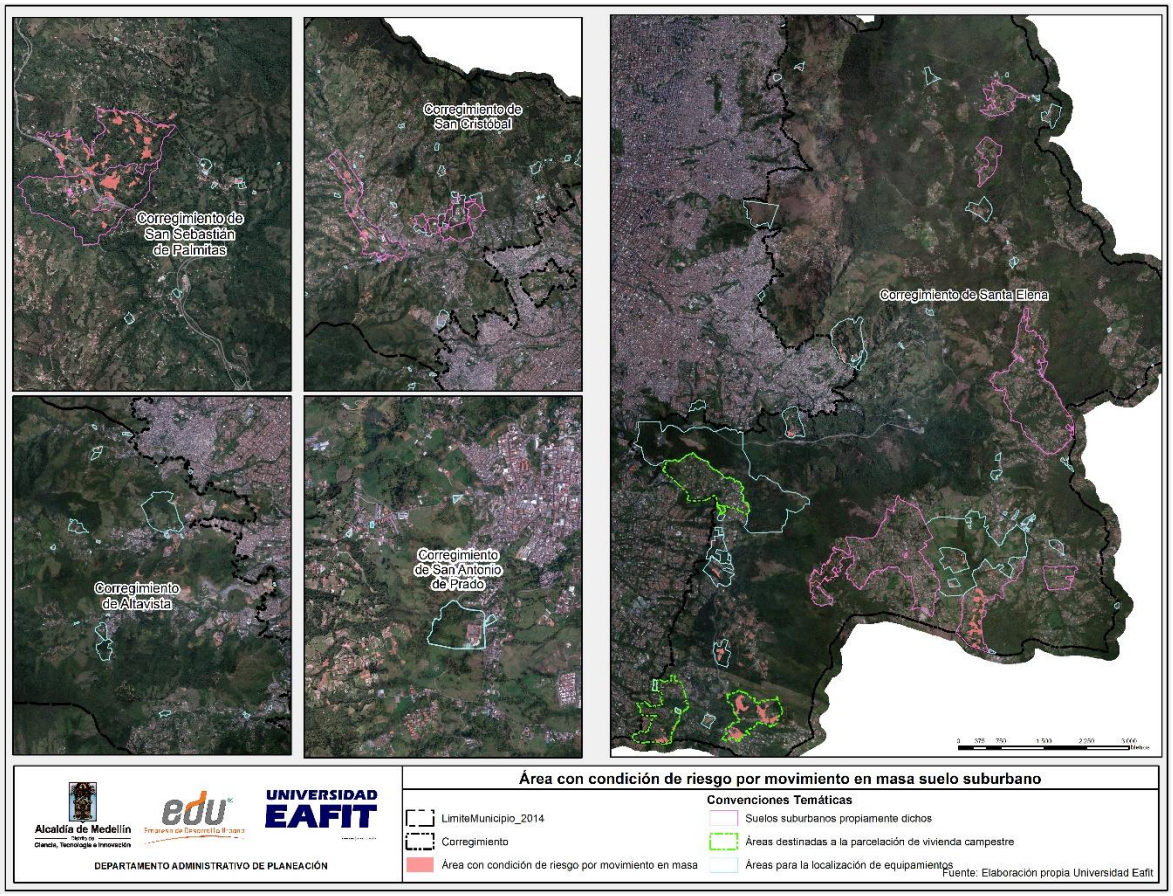


Ilustración 305. Áreas con condición de riesgo del suelo suburbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Los polígonos de la Aldea 2, Aldea, Pedregal Alto, Conexión Aburrá Cauca y El Plan son los que presentan mayor área con condición de amenaza por movimiento en masa, con rangos que oscilan entre 17,94 ha y 35,34 ha; los demás polígonos presentan áreas inferiores a las 10 ha en esta categoría (Ilustración 306).

En cuanto a las áreas con condición de riesgo por movimiento en masa, los polígonos de Chacaltaya, Conexión Aburrá Cauca, Aldea 2 y la Aldea presentan las mayores áreas bajo esta condición con 10,91 ha, 7,48 ha, 6,85 ha y 4,41 ha respectivamente; los demás polígonos presentan áreas inferiores las 2,14 ha en esta condición (Ilustración 307).

La zonificación de las ACA y ACR se encuentra en la GDB anexa y la codificación de cada polígono se presentan el Anexo 10. Zonificación de ACA y ACR.

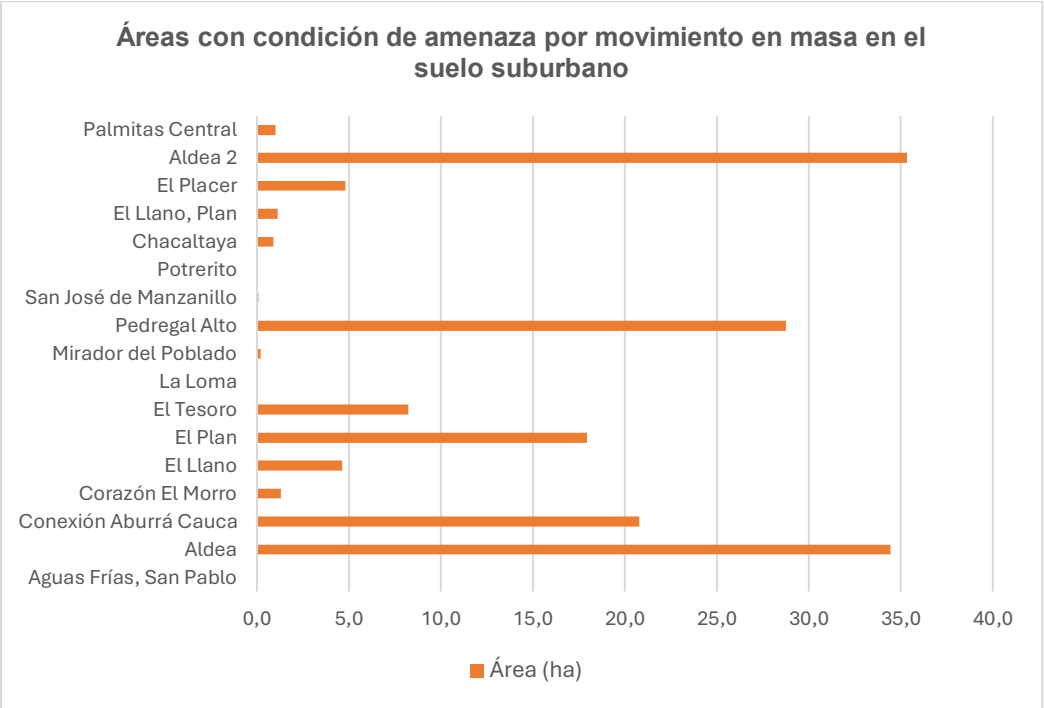


Ilustración 306. Áreas con condición de amenaza por polígono del suelo suburbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

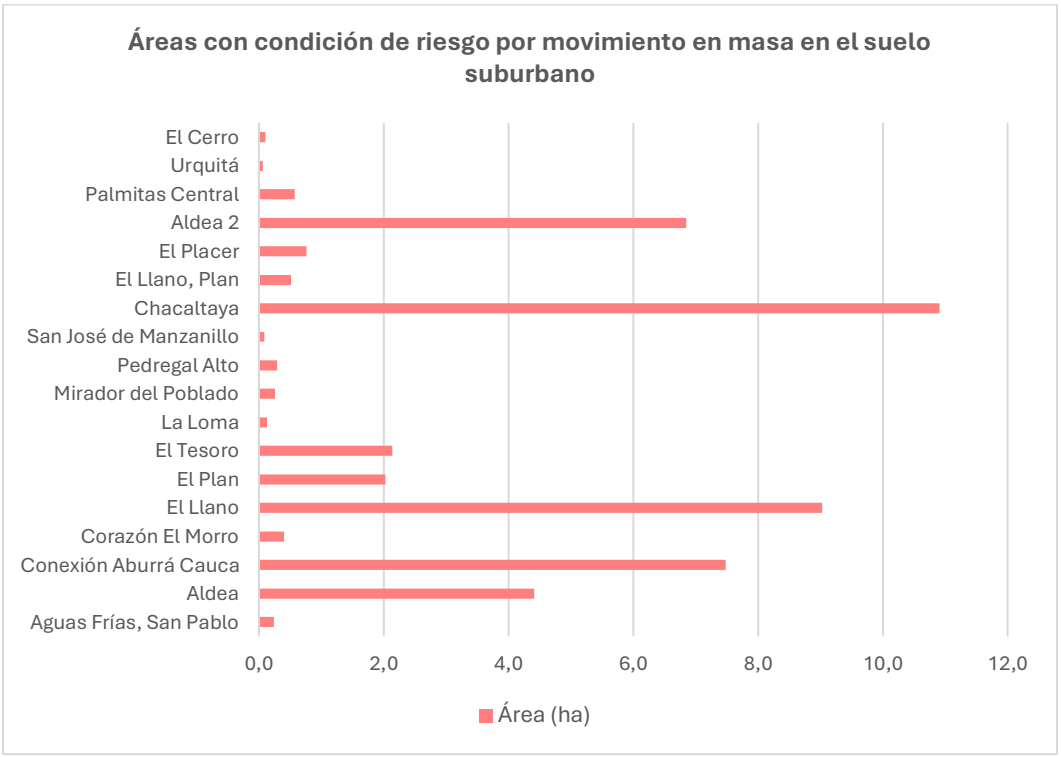


Ilustración 307. Áreas con condición de riesgo por polígono del suelo suburbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 102. Áreas con condición de amenaza y áreas con condición de riesgo suburbano del Distrito de Medellín

Suelo Suburbano	Áreas con condición de amenaza (ACA) Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo (ACR) Área (ha)
Potrerito (vereda Potrerito)	0,00	0,00
Conexión Aburra Cauca (Veredas Naranjal, El Llano La Cuchilla, El Uvito, Travesías, Las Playas, El Patio, La Palma)	20,79	7,48
La Loma (vereda La Loma)	0,02	0,13
Pedregal Alto (vereda Pedregal Alto y La Ilusión)	28,76	0,29
El Llano, Plan (Vereda Santa Elena sector Central)	1,14	0,52
El Tesoro (Vereda Las Palmas)	8,24	2,14
Chacaltaya (vereda Las Palmas)	0,91	10,91
El Llano (vereda Llano Santa Elena y Santa Elena sector central)	4,63	9,03
El Placer (Vereda El Placer, Piedra Gorda)	4,80	0,76
Mirador del Poblado (vereda Las Palmas)	0,21	0,25
El Cerro (vereda El Cerro)	0,00	0,11
El Plan (vereda El Plan)	17,95	2,02
San José de Manzanillo (Vereda San José de Manzanillo y El Jardín**)**	0,08	0,09
Aguas Frías - San Pablo (vereda Aguas Frías y San Pablo)	0,04	0,24
Corazón - El Morro (vereda Corazón - El Morro)	1,29	0,40
Urquitá (vereda Urquitá)	0,00	0,06
Aldea 2 (vereda La Aldea y Palmitas sector central)	35,34	6,85
Aldea (vereda La Aldea)	34,44	4,41
Palmitas Central (Vereda Palmitas sector central)	1,01	0,57

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Otra de las categorías de desarrollo restringido del suelo suburbano corresponde con los centros poblados, la Aldea 2, la Aldea y Pedregal Alto corresponden con los centros poblados que mayores áreas presentan en condición de amenaza por movimiento en masa, por su parte, los centros poblados Corazón El Morro, San José del Manzanillo y Aguas Frías – San Pablo Pajarito presentan mayores áreas en condición de riesgo por movimiento en masa.

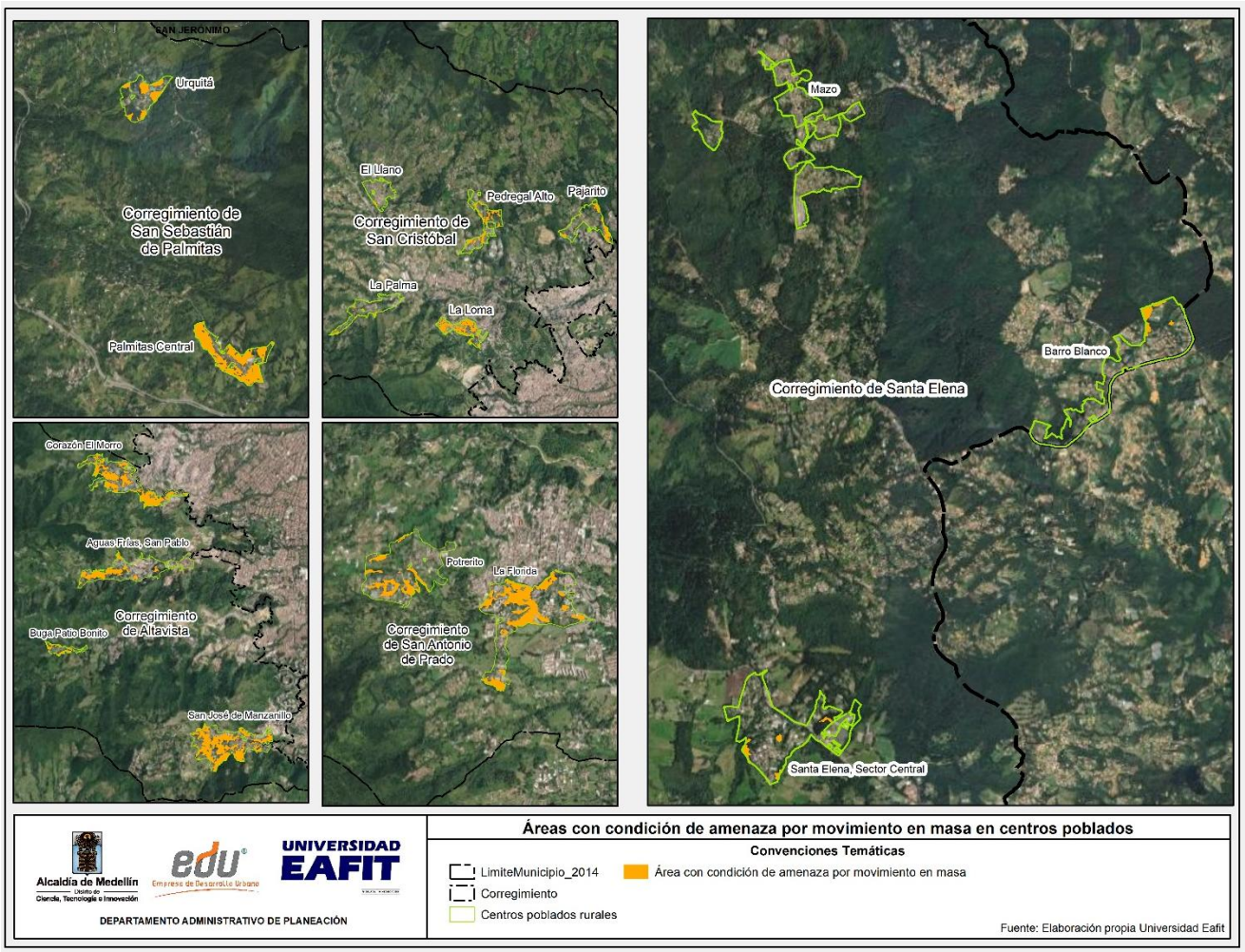


Ilustración 308. Áreas con condición de amenaza por movimiento en masa en centros poblados del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

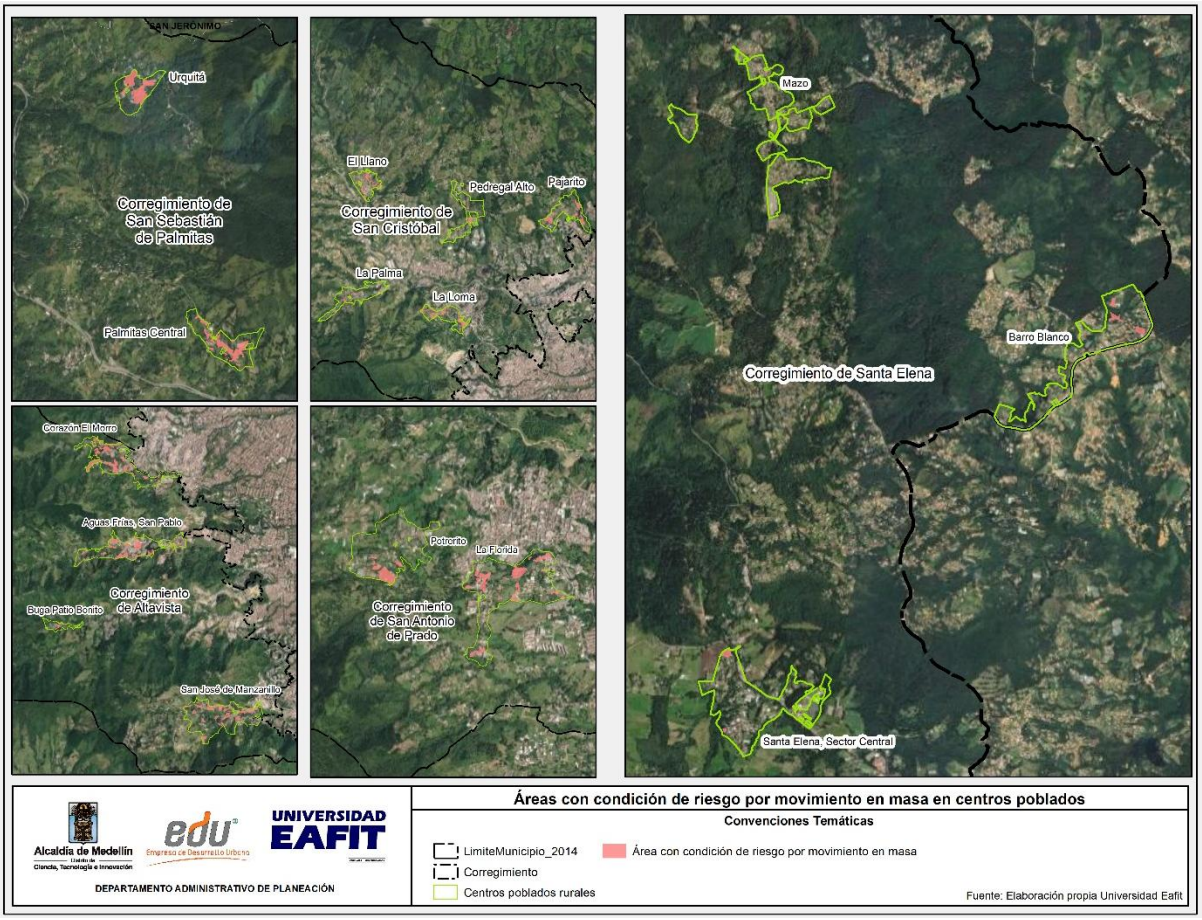


Ilustración 309. Áreas con condición de riesgo por movimiento en masa en los centros poblados del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 103. Áreas con condición de amenaza y áreas con condición de riesgo por movimiento en masa en centros poblados del Distrito de Medellín

Corregimiento	Centro Poblado	Áreas con condición de amenaza (ACA) Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo (ACR) Área (ha)
Altavista	Corazón El Morro	23,32	12,76
	Aguas Frías, San Pablo	9,84	8,73
	San José del Manzanillo	32,36	9,43
	Buga Patio Bonito	2,60	0,59
San Sebastián de Palmitas	Palmitas central	10,24	3,55
	Urquitá	2,83	3,74
San Antonio de Prado	Potrerito	4,41	2,01
	La Florida	11,46	4,25
San Cristóbal	La Palma	1,93	1,70
	El Llano	0,54	3,52
	Pedregal Alto	8,42	1,80
	Pajarito	5,97	5,30

Corregimiento	Centro Poblado	Áreas con condición de amenaza (ACA) Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo (ACR) Área (ha)
	La Loma	13,33	6,26
Santa Elena	Santa Elena, sector central	1,13	0,45
	Barro Blanco	1,26	0,91
	Mazo, Los Vasquez	0,00	0,00
	Mazo	0,00	0,00

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

San José del Manzanillo y Corazón El Morro son los centros poblados que presentan las mayores áreas bajo condición de amenaza por movimiento en masa con 32,36 ha y 23,32 ha respectivamente, los demás centros poblados presentan áreas menores a 13,33 ha.

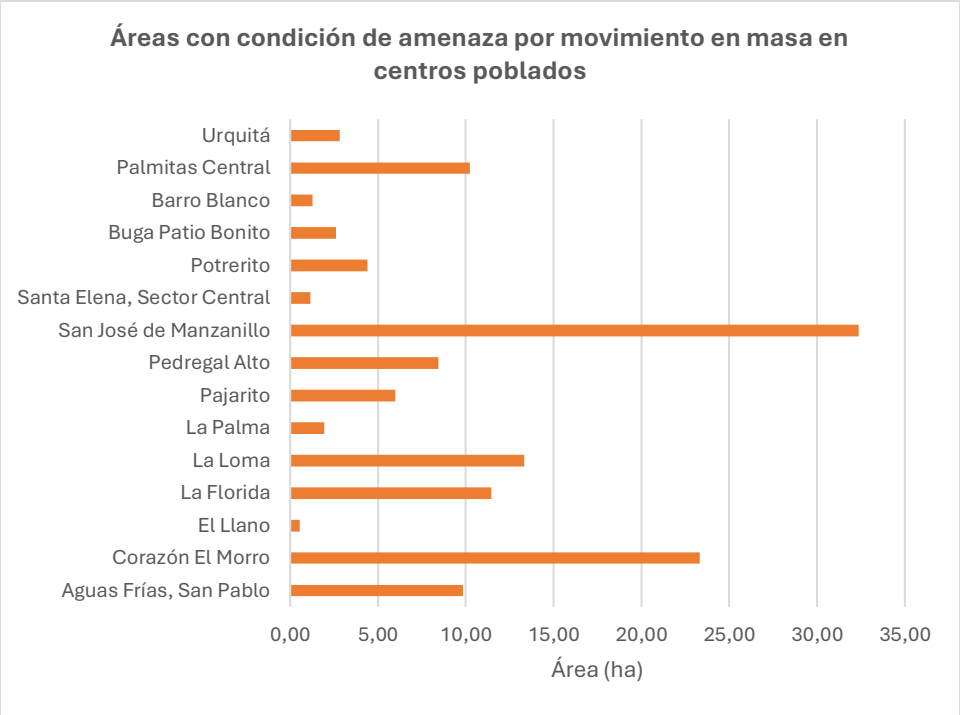


Ilustración 310. Áreas con condición de amenaza por movimiento en masa en los centros poblados del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

En cuanto a las áreas con condición de riesgo por movimiento en masa, el centro poblado de Corazón El Morro presenta mayor área con 12,76 ha, los demás polígonos presentan áreas bajo está condición de menos de 10 ha.

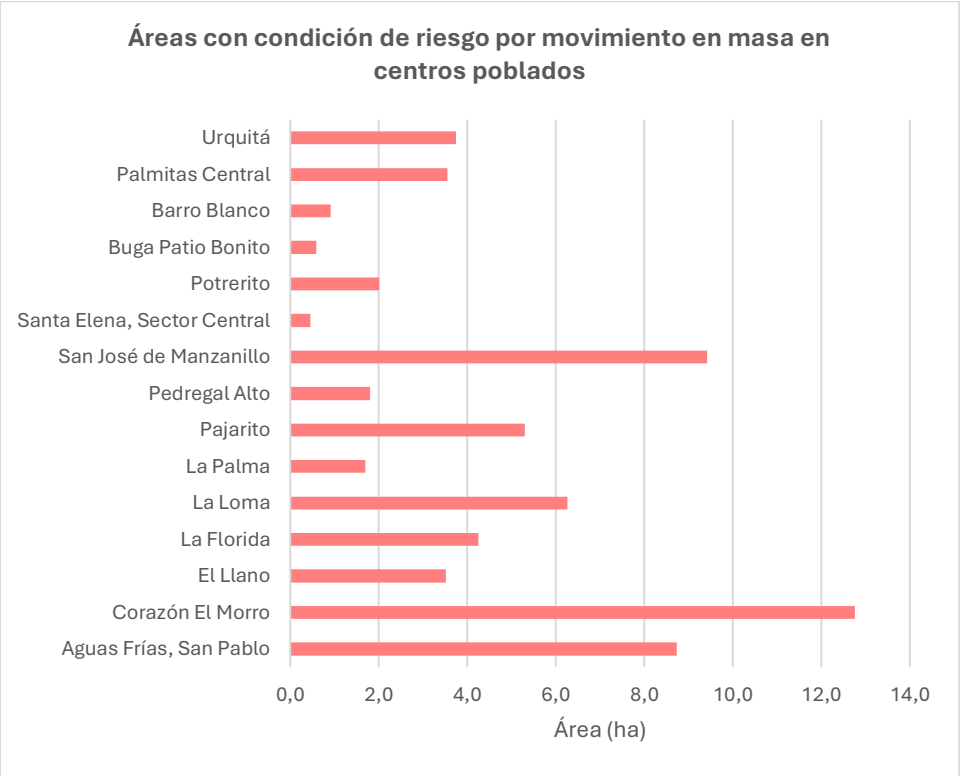


Ilustración 311. Áreas con condición de riesgo por movimiento en masa en los centros poblados del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

12.3 ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO DEL SUELO URBANO

De la zonificación de áreas con condición de amenaza urbano se obtuvieron 1.537 polígonos que cubren el 691,24 ha y de las áreas con condición de riesgo urbano se obtuvieron 860 polígonos que cubren 702,09 ha.

La codificación de cada polígono (ACA) se realizó de acuerdo con: Prefijo URA (urbano Amenaza) + Código comuna (xx) + Código barrio (xxxx) + Consecutivo del polígono por barrio (xx).

La codificación de cada polígono (ACR) se realizó de acuerdo con: Prefijo URR (urbano Riesgo) + Código comuna (xx) + Código barrio (xxxx) + Consecutivo del polígono por barrio (xx).

En la Tabla 104 se presentan las áreas en cada una de las condiciones por polígono urbano (Ilustración 312 a Ilustración 315).

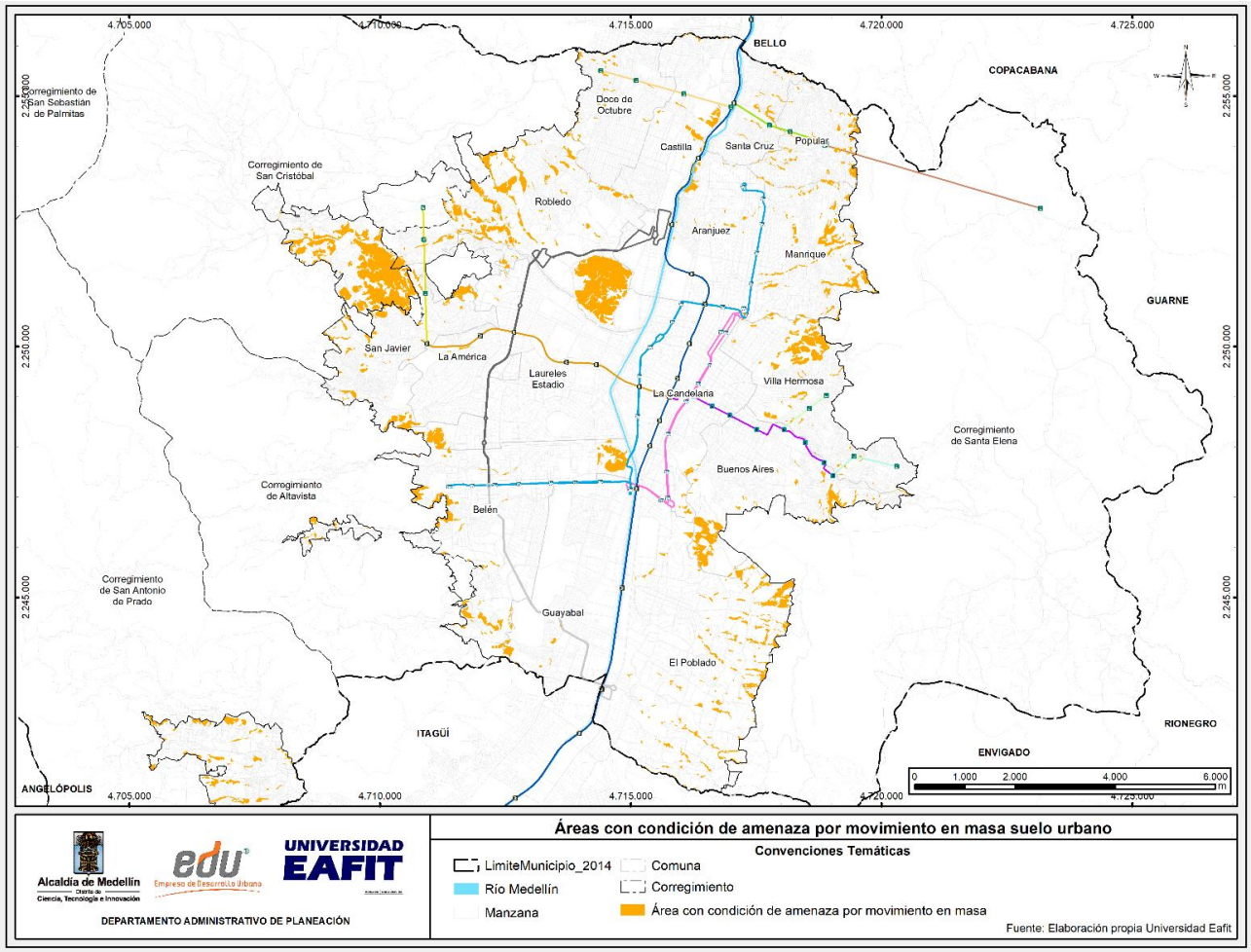


Ilustración 312. Áreas con condición de amenaza del suelo urbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

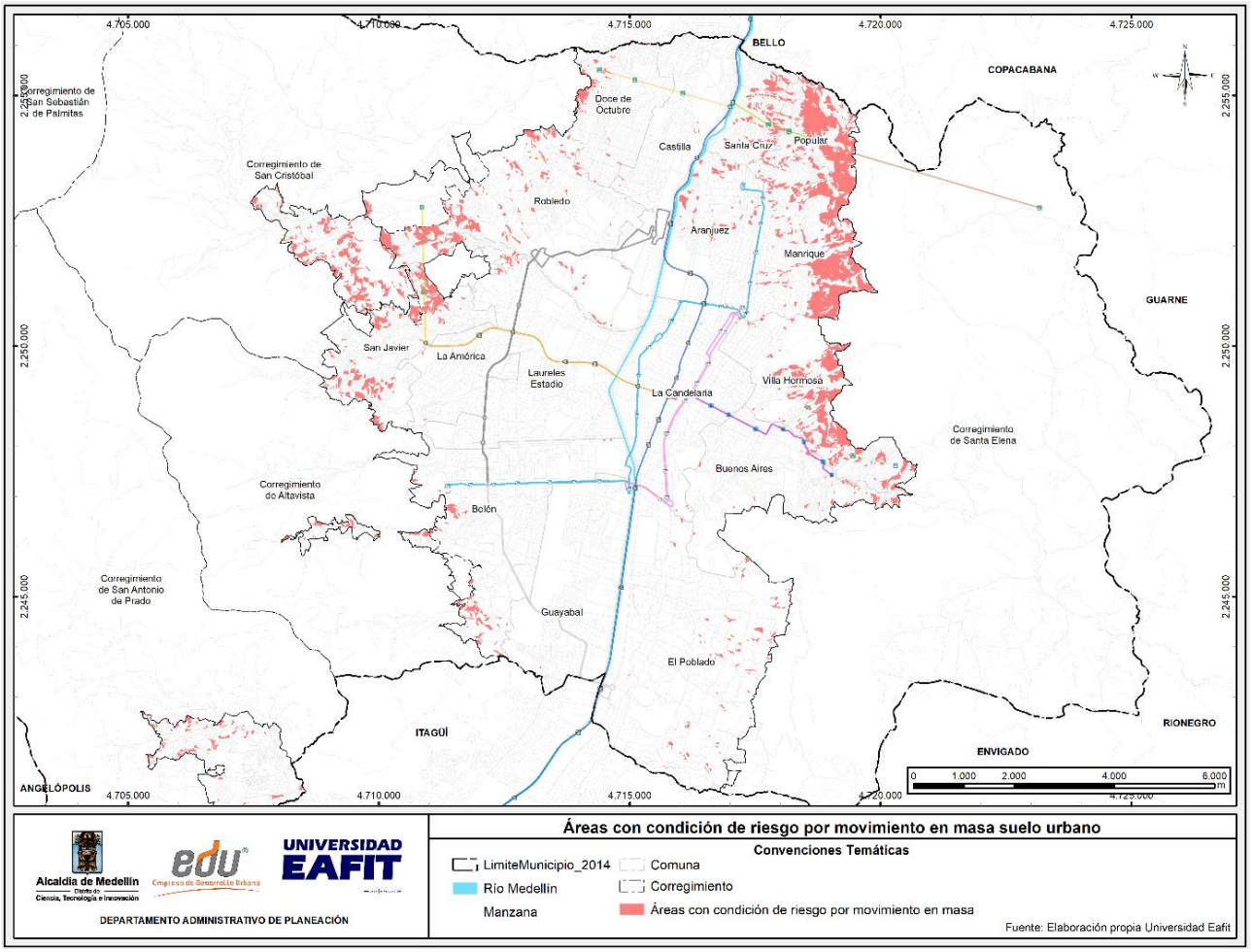


Ilustración 313. Áreas con condición de riesgo del suelo urbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

La comuna 7 es la que presenta un área con condición de amenaza mayor extensión con 168,98 ha, seguida de las comunas 14, 16, 8, 9, 3 y 13 con áreas de 65,16 ha, 49,35 ha, 46,28 ha, 42,55 ha, 40,95 ha y 39,29 ha respectivamente. La comuna 1 y 5 presentan 17,18 ha y 13,67 ha en esta condición y las comunas 2, 4, 6, 10, 11, 12 y 15 no superan las 10 ha (Ilustración 314).

En relación a las áreas con condición de riesgo, las comunas 3, 1, 8, 7 y 13 son las que presentan las mayores áreas en esta condición correspondientes a 152,55 ha, 114,12 ha, 99,78 ha, 67,93 ha y 51,73 ha respectivamente; seguido de las comunas 2 y 4 con áreas de 30,28 ha y 15,68 ha. Las demás comunas presentan áreas inferiores a 20 ha en esta condición (Ilustración 315).

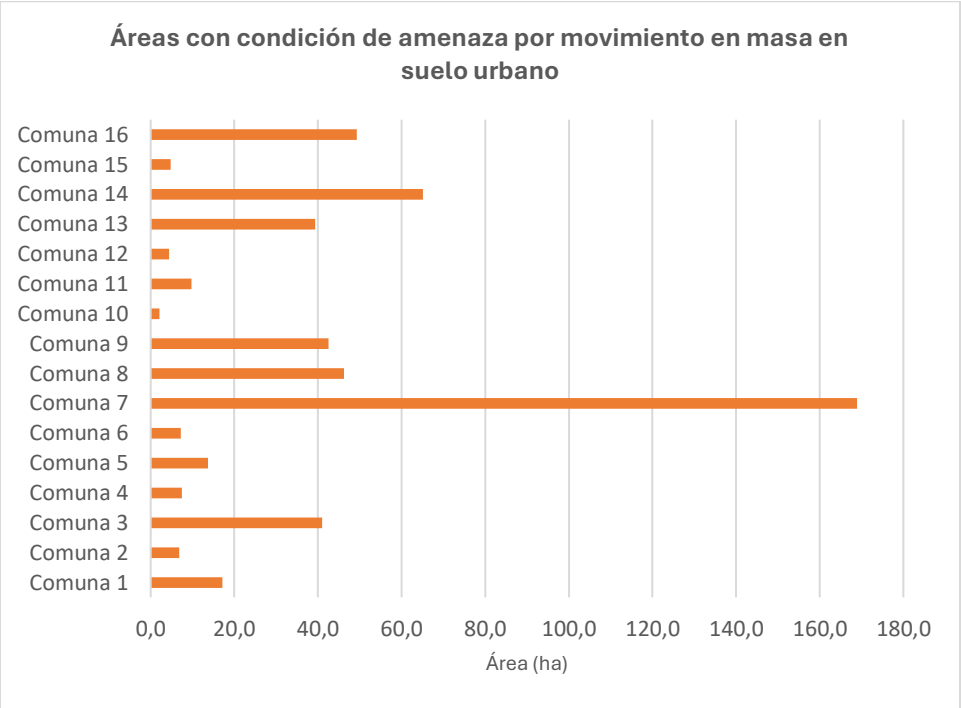


Ilustración 314. Áreas con condición de amenaza por polígono del suelo urbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

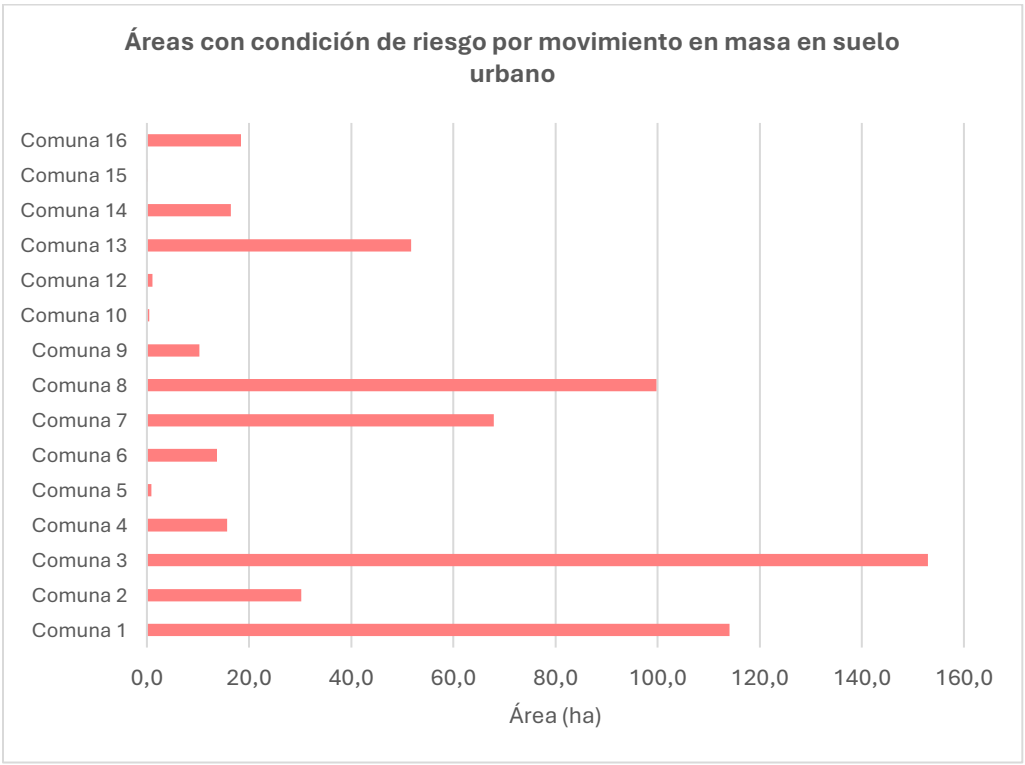


Ilustración 315. Áreas con condición de riesgo por polígono del suelo urbano del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 104. Áreas con condición de riesgo del suelo urbano del Distrito de Medellín

Comuna	Áreas con condición de amenaza Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo Área (ha)
Comuna 1- Popular	17,18	114,12
Comuna 2- Santa Cruz	6,88	30,28
Comuna 3 - Manrique	40,95	152,99
Comuna 4 - Aranjuez	7,48	15,68
Comuna 5 - Castilla	13,67	0,84
Comuna 6 – 12 de Octubre	7,21	13,76
Comuna 7 - Robledo	168,98	67,93
Comuna 8 – Villa Hermosa	46,28	99,78
Comuna 9 – Buenos Aires	42,55	10,32
Comuna 10 – La Candelaria	2,07	0,50
Comuna 11 - Laureles	9,77	0,00
Comuna 12 – La América	4,37	1,11
Comuna 13 – San Javier	39,29	51,73
Comuna 14 – El Poblado	65,16	16,44
Comuna 15 - Guayabal	4,79	0,16
Comuna 16 -Belén	49,35	18,38

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

12.4 ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO DEL SUELO URBANO CORREGIMENTAL

En la Tabla 105 se presentan las áreas en cada una de las condiciones por polígono urbano corregimental (Ilustración 316).

La codificación de cada polígono (ACA) se realizó de acuerdo con: Prefijo CGA (Corregimiento Amenaza) + Código corregimiento (xx) + Código vereda o cabecera (xxxx) + Consecutivo del polígono por vereda o cabecera (xx).

La codificación de cada polígono (ACR) se realizó de acuerdo con: Prefijo CGR (Corregimiento Riesgo) + Código corregimiento (xx) + Código vereda o cabecera (xxxx) + Consecutivo del polígono por vereda o cabecera (xx).

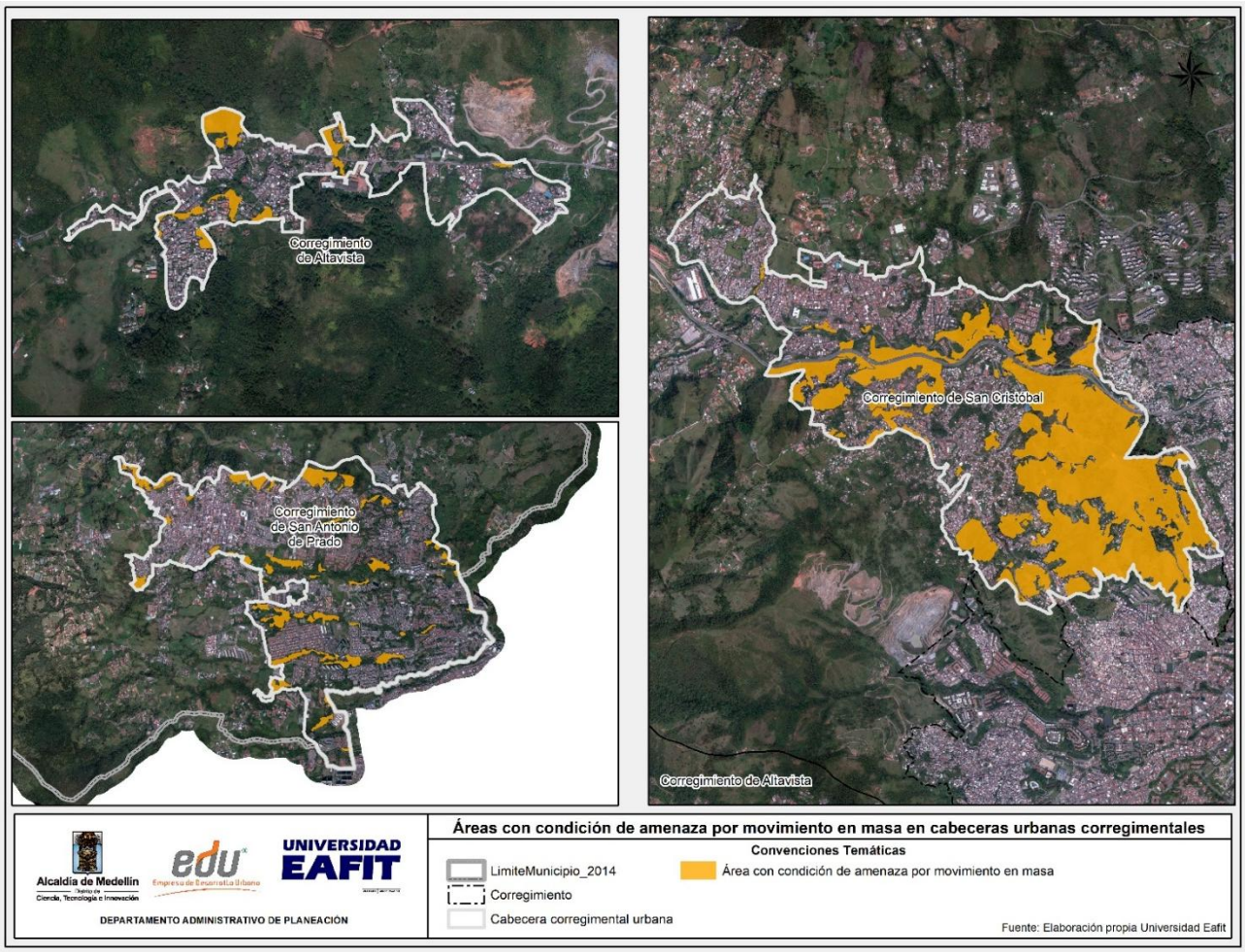


Ilustración 316. Áreas con condición de amenaza del suelo urbano de los corregimientos Altavista, San Cristóbal y San Antonio de Prado

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

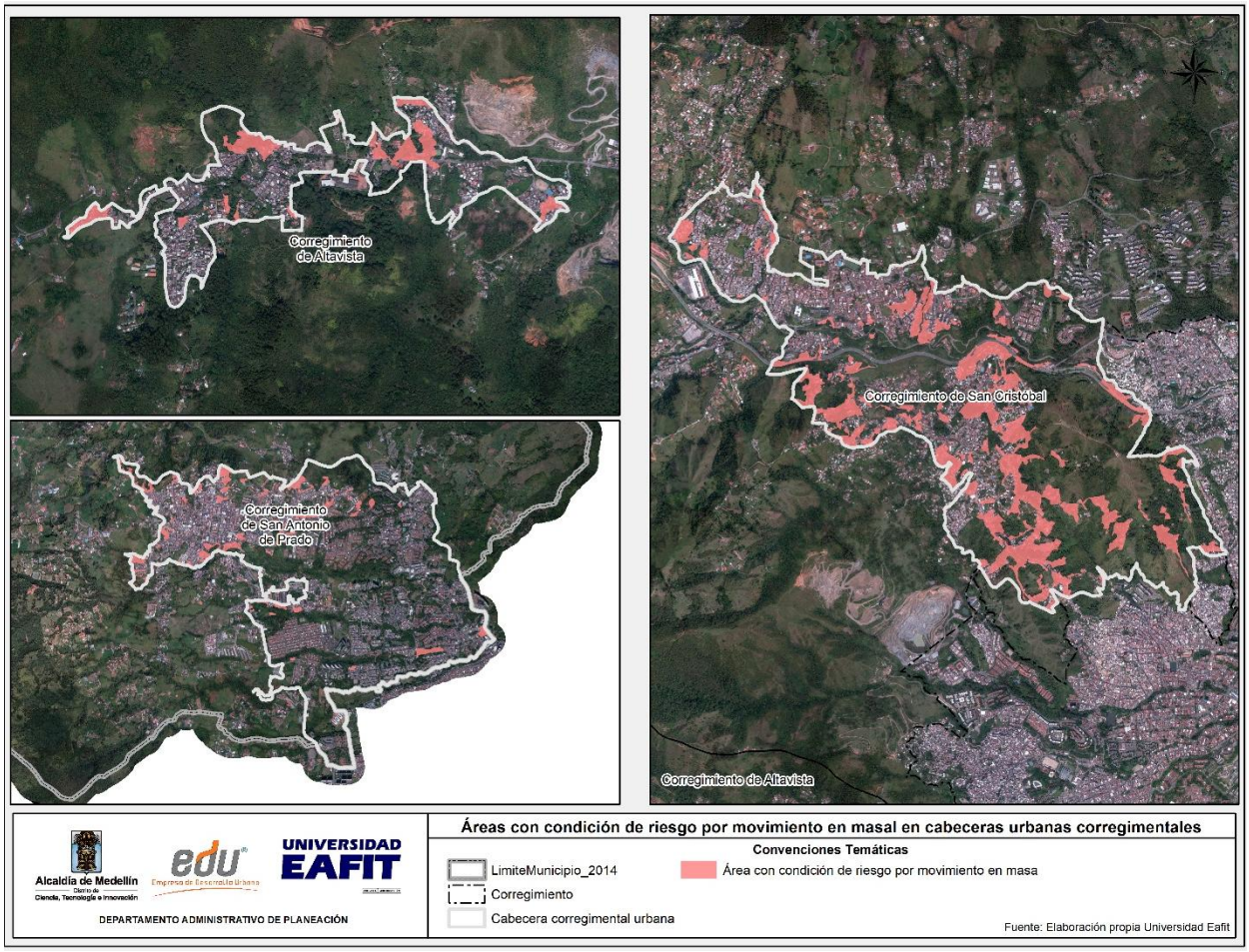


Ilustración 317. Áreas con condición de riesgo del suelo urbano de los corregimientos Altavista, San Cristóbal y San Antonio de Prado

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 105. Áreas con *condición de* amenaza y condición de riesgo del suelo urbano corregimental *del Distrito de Medellín*

Suelo urbano corregimental	**Áreas con condición de amenaza** Área (ha)	**Áreas con condición de Riesgo** Área (ha)
Cabecera corregimental San Cristóbal (60)	130,62	74,38
Cabecera corregimental Altavista (70)	3,99	5,40
Cabecera corregimental San Antonio de Prado (80)	31,01	17,81

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

El Corregimiento de San Cristóbal es el que presenta la mayor área de su territorio en condición de amenaza con 130,62 ha, seguido de San Antonio de Prado con 31,01 ha y Altavista con 3,99 ha (Ilustración 318). En referencia a las áreas con condición de riesgo tienen la misma tendencia, San

Cristóbal presentan la mayor área con 74,38 ha seguido de San Antonio de Prado con 17,81 ha y Altavista con 5,40 ha (Ilustración 319).

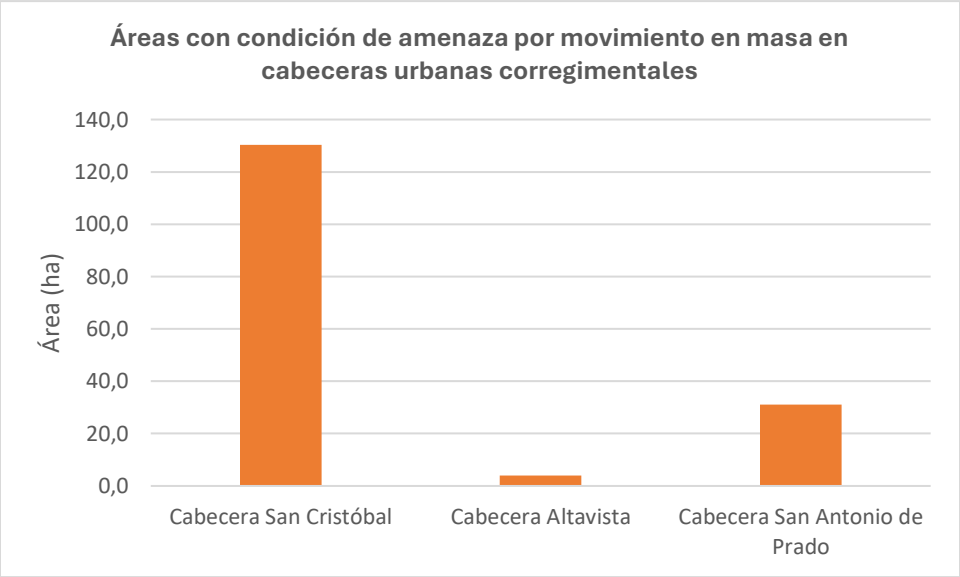


Ilustración 318. Áreas con condición de amenaza del suelo urbano de los corregimientos Altavista, San Cristóbal y San Antonio de Prado

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

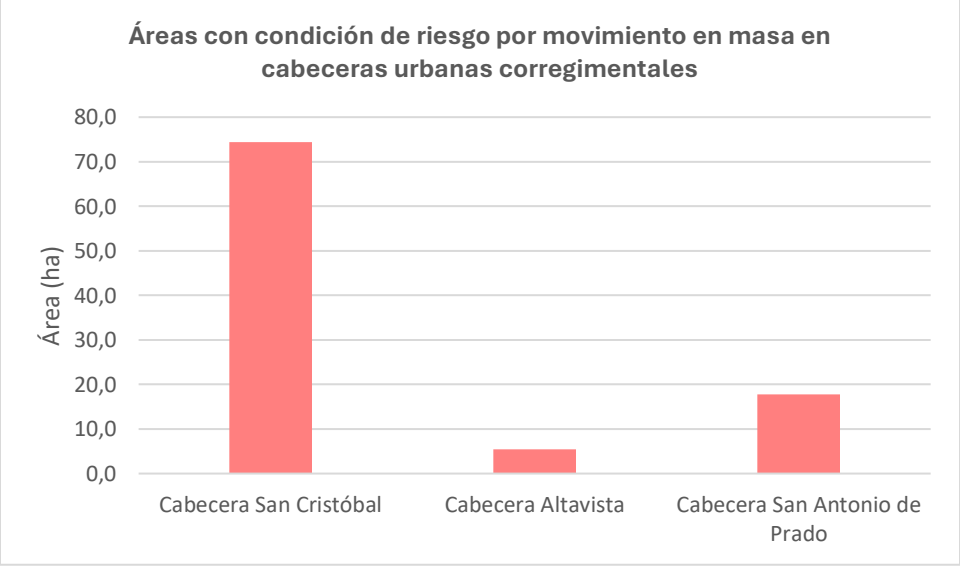


Ilustración 319. Áreas con condición de riesgo del suelo urbano de los corregimientos Altavista, San Cristóbal y San Antonio de Prado

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

12.5 ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO DEL SUELO DE EXPANSIÓN

De la zonificación de áreas con condición de amenaza de suelos de expansión se obtuvieron 102 polígonos que cubren el 67,40 ha y de las áreas con condición de riesgo de los suelos de expansión se obtuvieron 19 polígonos que cubren 19,67 ha.

La codificación de cada polígono (ACA) se realizó de acuerdo con: Prefijo EXA (Expansión Amenaza) + Código corregimiento o Comuna(xx) + Código vereda o barrio (xxxx) + Consecutivo del polígono por vereda o barrio (xx).

La codificación de cada polígono (ACR) se realizó de acuerdo con: Prefijo EXR (Suburbano Riesgo) + Código corregimiento o Comuna (xx) + Código vereda o barrio (xxxx) + Consecutivo del polígono por vereda o barrio (xx).

En la Tabla 106 se presentan las áreas en cada una de las condiciones por polígono de suelo de expansión (Ilustración 320 a Ilustración 323).

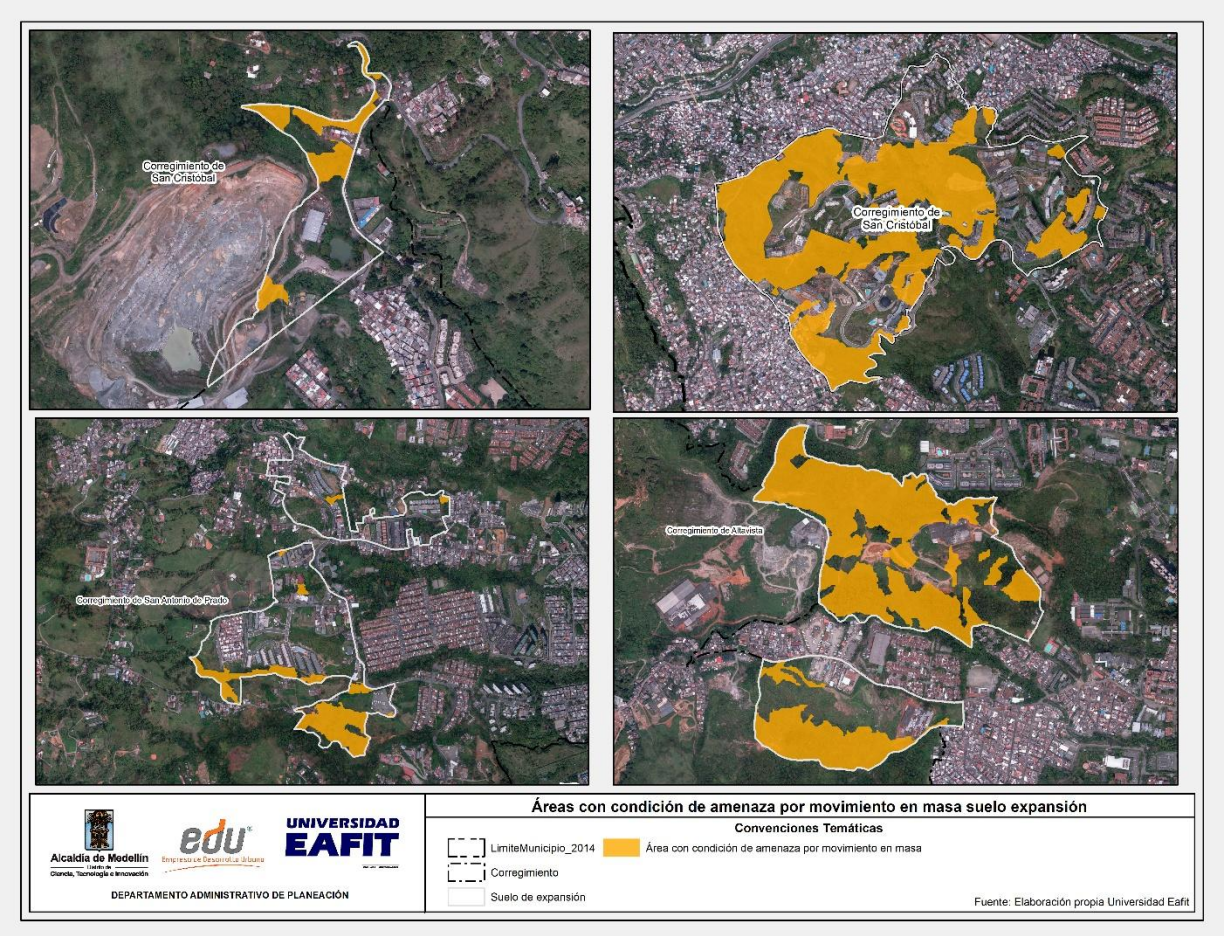


Ilustración 320. Áreas con condición de amenaza de los suelos de expansión del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

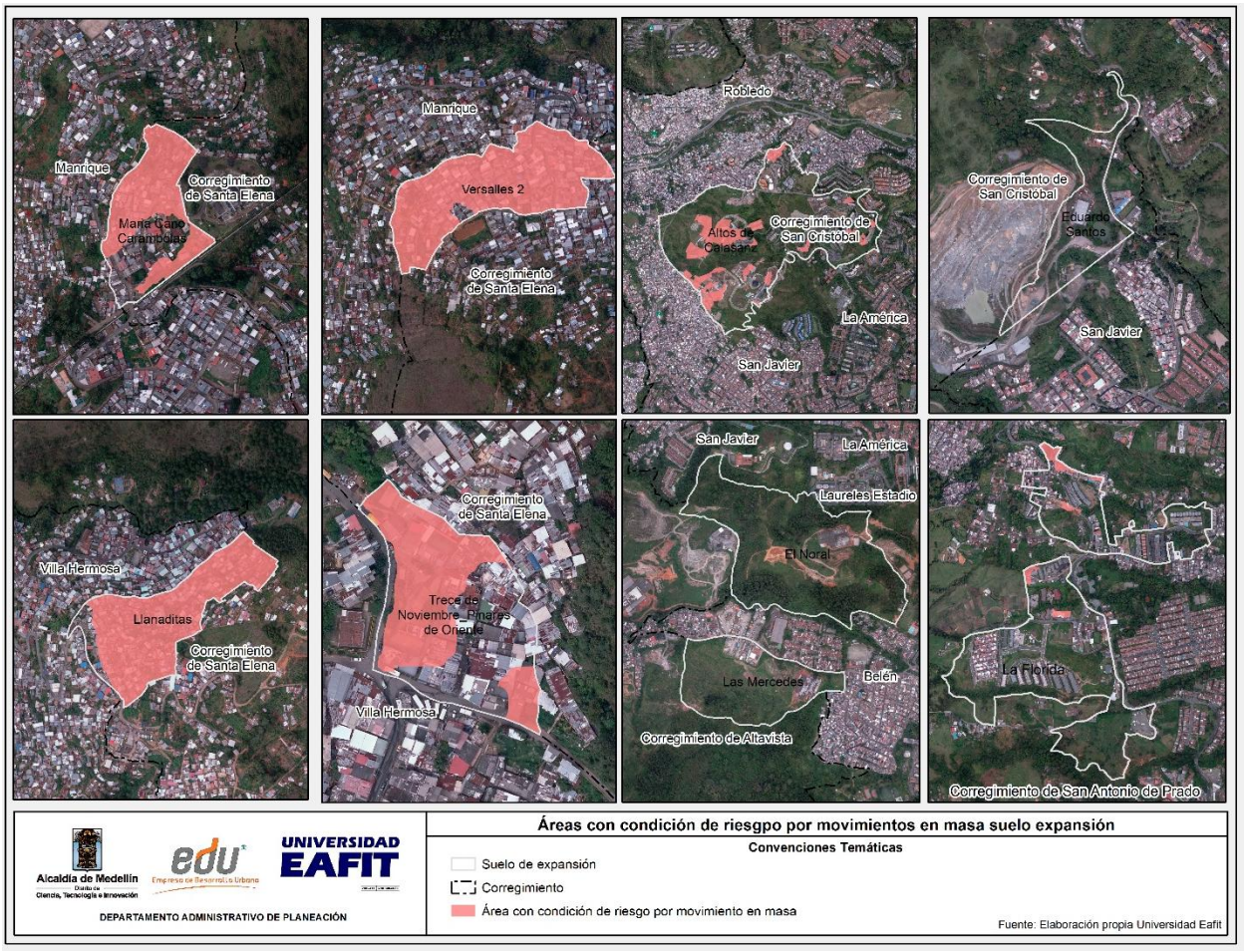


Ilustración 321. Áreas con condición de riesgo de los suelos de expansión del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

De los 9 polígonos de expansión, solo 5 presentan áreas en condición de amenaza, siendo Altos de Calasanz el que mayor área tiene en esta condición con 34,40 ha, seguido por el polígono de El Noral que tiene la totalidad del área con condición de amenaza de 20,10 ha; los otros 3 polígonos presentan ACA menores de 6,3 ha (Ilustración 322).

Las áreas con condición de riesgo corresponden a 7 de los 9 polígonos de expansión, para el polígono Alto de Calasanz es el que mayor área posee con 9,36 ha, seguido de Llanaditas con 3,77 ha, Versalles 2 con 3,39 ha, María Cano – Carambolas con 1,79. Los polígonos La Florida, Trece de Noviembre y Eduardo Santos tienen menos de 1 ha en esta condición, por su parte, los polígonos El Noral y Las Mercedes no tienen áreas en esta condición (Ilustración 323).

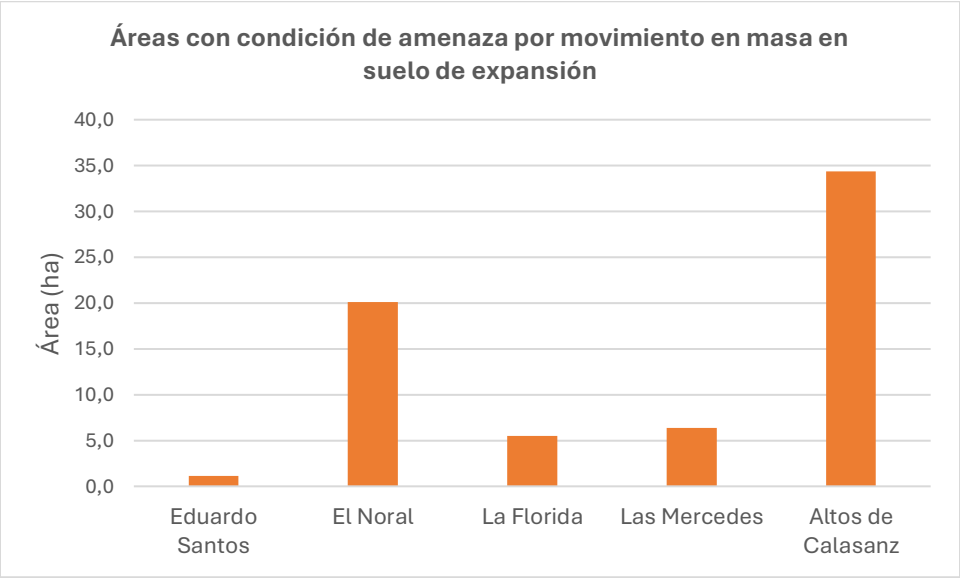


Ilustración 322. Áreas con condición de amenaza por polígono de los suelos de expansión del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

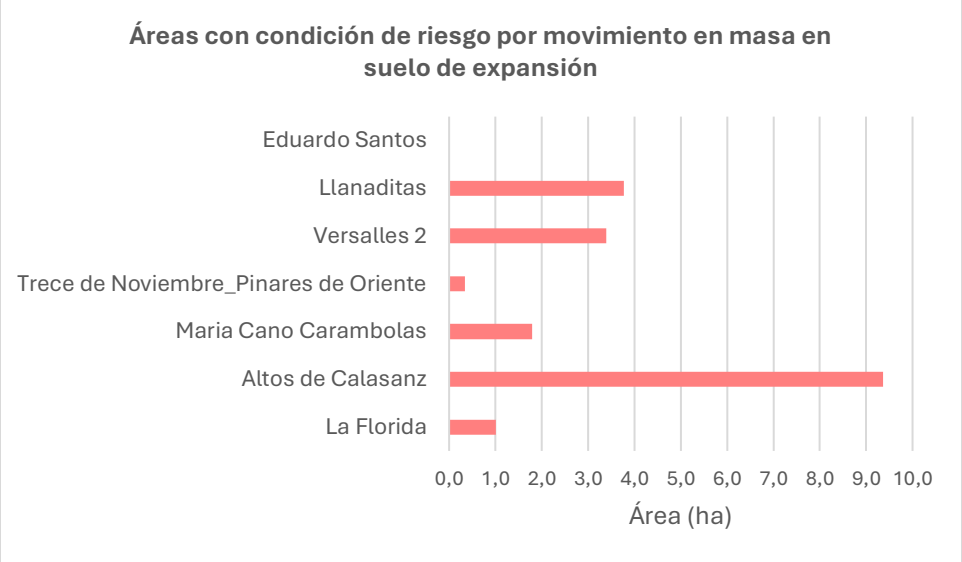


Ilustración 323. Áreas con condición de riesgo por polígono de los suelos de expansión del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 106. Áreas con condición de riesgo de suelos de expansión del Distrito de Medellín

Suelo de expansión	Áreas con condición de amenaza Área (ha)	Áreas con condición de Riesgo Área (ha)
Las Mercedes (Vereda San Pablo – corregimiento Altavista)	6,34	0,00
El Noral (Vereda El Corazón - El Morro)	20,10	0,00
La Florida (Área de expansión San Antonio de Prado)	5,47	1,01
Eduardo Santos (Área de expansión San Antonio de Prado)	1,13	0,00
Altos de Calasanz (Área de Expansión San Cristóbal)	34,36	9,36
María Cano Carambolas (Vereda Piedras Blanca matasano)	0,00	1,79
Versalles N_2 (Vereda Piedras Blanca matasano)	0,00	3,39
Llanaditas (Vereda Piedras Blanca matasano)	0,00	3,77
Trece de Noviembre_Pinares de Oriente (Vereda Piedras Blanca matasano)	0,00	0,34

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

12.6 ÁREAS EN RIESGO – ESTUDIOS DE DETALLE

En esta clasificación se reportan las categorías de riesgo alto no mitigable, riesgo alto mitigable, riesgo medio y riesgo bajo de los estudios de detalle.

Los polígonos definidos en riesgo con base en los estudios de detalle elaborados bajo el Decreto 1807 de 2014 compilado en el Decreto 1077 de 2015, en el Distrito de Medellín cubren el 490,56 ha del área del Distrito

La codificación de cada polígono se realizó de acuerdo con: Prefijo ED (Estudio de Detalle) + Código POT (xxxx-xx).

En la *Tabla 107* se presentan las áreas para cada categoría por comuna (Ilustración 324).

Tabla 107. Áreas con categoría de riesgo de estudios de detalle del Distrito de Medellín

Comuna	Área (ha)
Comuna 1. Corresponde a 8 polígonos que se ubican en los barrios: Santo Domingo Sabio No1 Y No2, La Avanzada, Moscú No2 y el Compromiso	68,80
Comuna 2. Corresponde a 1 polígono en el barrio La Francia	0,16
Comuna 3. Corresponde a 4 polígono, ubicados en los barrios Oriente y santa Inés y La Cruz	76,34
Comuna 4, corresponde a 2 polígonos en el barrio Moravia	8,77

Comuna	Área (ha)
Comuna 6. Corresponde a 4 polígonos ubicados en los barrios El Triunfo, Mirador del 12, El Picachito y barrio La Esperanza	5,21
Comuna 7. Corresponde a dos polígonos en el barrio Santa Margarita.	41,74
Comuna 8. Corresponde a 17 polígonos en los barrios La Libertad, Villatina, San Antonio, Las Estancias, Villa Turbay.	107,70
Comuna 9, corresponde a 1 solo polígono ubicado en los barrios Juan Pablo II y 8 de Marzo.	16,28
Comuna 13	43,42
Comuna 16. Corresponde a 2 polígonos en el barrio Altavista.	0,07
Corregimiento 50	37,99
Corregimiento 60	39,35
Corregimiento 70	1,67
Corregimiento 90	27,85
Área de expansión	14,60
Área Suburbana	0,09
SN (Corresponde a polígonos que se encuentran dispersos en el área del Distrito y no tienen asignación de clasificación del suelo desde el POT).	0,52

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

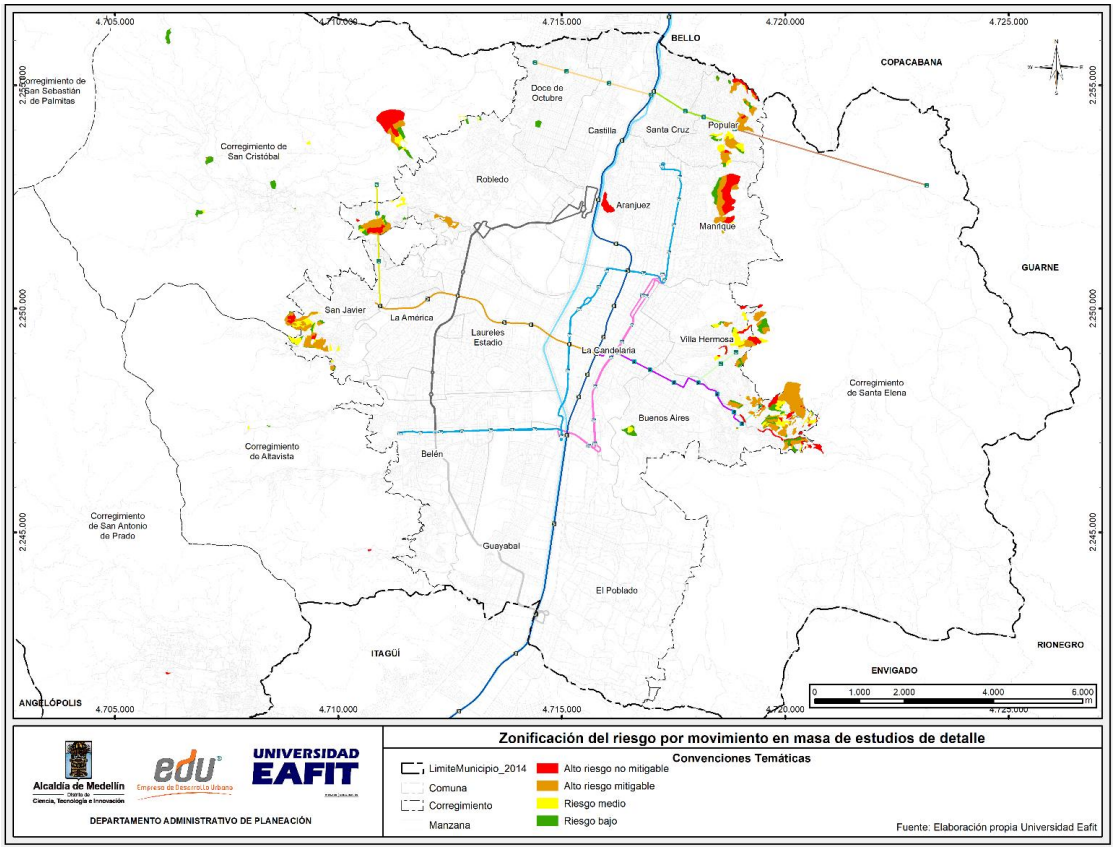


Ilustración 324. Áreas en la categoría de riesgo por estudios de detalle del Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

12.7 PRIORIZACIÓN DE ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA

En las áreas con condición de riesgo de todo el distrito se realizó la priorización de polígonos de acuerdo con el número de construcciones localizadas dentro de cada polígono delimitado, con el propósito de identificar aquellos sectores con mayor concentración de elementos expuestos y, por tanto, con mayor potencial de afectación. Esta se realizó con la base catastral existente (Enero 2025), con la novedad de que esta capa no incluye algunos de los asentamientos subnormales.

En la Tabla 108 se presenta la priorización de 28 polígonos con condición de riesgo por movimiento en masa (Anexo 11 Priorización de ACR).

Tabla 108. Priorización de polígonos con condición de riesgo por movimiento en masa del Distrito de Medellín

No	Código ACR	Barrio	Area (ha)	Clasificación del suelo
1	UR_01_0112_1	Carpinelo	27,60	Urbano
2	UR_03_0311_3	La Cruz	32,42	Urbano
3	UR_03_0309_4	Versalles No.1	16,85	Urbano
4	UR_03_0313_4	María Cano-Carambolas	23,69	Urbano
5	UR_03_0310_4	Versalles No.2	20,44	Urbano
6	UR_08_0811_9	Trece de Noviembre	8,21	Urbano
7	UR_13_1314_9	Las Independencias	5,64	Urbano
8	UR_02_0201_9	La Isla	5,50	Urbano
9	UR_08_0806_13	Llanaditas	8,54	Urbano
10	UR_13_SN01_8	Sin Nombre	6,22	Urbano
11	UR_03_0312_10	Oriente	12,11	Urbano
12	UR_01_0101_14	Santo Domingo Savio No.1	7,50	Urbano
13	UR_01_0111_7	La Avanzada	9,89	Urbano
14	UR_08_0813_27	Villatina	4,08	Urbano
15	UR_03_0305_9	El Raizal	4,49	Urbano
16	UR_13_1318_5	Antonio Nariño	5,45	Urbano
17	UR_16_1610_7	El Rincón	0,10	Urbano
18	UR_16_1610_14	El Rincón	4,14	Urbano
19	UR_16_1610_13	El Rincón	0,63	Urbano
20	UR_09_0902_7	Barrios de Jesús	1,61	Urbano
21	UR_09_0902_2	Barrios de Jesús	0,07	Urbano
22	UR_08_0806_15	Llanaditas	4,25	Urbano
23	UR_07_0712_19	Aures No.2	0,02	Urbano
24	UR_07_0712_15	Aures No.2	3,72	Urbano
25	UR_03_0312_12	Oriente	1,49	Urbano
26	UR_03_0311_2	La Cruz	5,61	Urbano
27	EX_90_9003_4	Piedras Blancas - Matasano	3,38	Expansión Urbana
28	EX_90_9003_1	Piedras Blancas - Matasano	1,78	Expansión Urbana

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Adicional a estos polígonos se priorizaron 17 polígonos del suelo rural, en su mayoría corresponden a barrios subnormales de los cuales no tiene número de construcciones debido a que no hay capa de actualización catastral de estas zonas. La priorización se realizó por área (Tabla 109).

Tabla 109. Priorización de polígonos con condición de riesgo por movimiento en masa del Distrito de Medellín

No	Código ACR	Barrio	Area (ha)	Clasificación del suelo
1	RR_60_6011_3	El Picacho	4,55	Rural
2	RR_90_9003_20	Piedras Blancas - Matasano	14,45	Rural
3	RR_90_9003_33	Piedras Blancas - Matasano	5,74	Rural
4	RR_90_9003_32	Piedras Blancas - Matasano	1,69	Rural
5	RR_90_9003_29	Piedras Blancas - Matasano	0,15	Rural
6	RR_90_9003_24	Piedras Blancas - Matasano	13,60	Rural
7	RR_90_9003_23	Piedras Blancas - Matasano	12,79	Rural
8	RR_90_9003_2	Piedras Blancas - Matasano	0,50	Rural
9	RR_90_9003_19	Piedras Blancas - Matasano	7,59	Rural
10	RR_90_9001_10	Las Palmas	5,05	Rural
11	RR_80_8003_1	Montañita	3,25	Rural
12	RR_70_7008_4	El Jardín	3,60	Rural
13	RR_70_7008_3	El Jardín	31,97	Rural
14	RR_70_7007_2	San José del Manzanillo	5,23	Rural
15	RR_60_6011_18	El Picacho	0,13	Rural
16	RR_60_6011_17	El Picacho	0,76	Rural
17	RR_60_6011_16	El Picacho	1,05	Rural

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

13 MEDIDAS DE INTERVENCIÓN

Las medidas de intervención a partir del estudio básico son fundamentalmente medidas de tipo no estructural y están orientadas a definir las restricciones para el desarrollo de zonas que se encuentran en amenaza alta y media principalmente. En términos generales las medidas de intervención están agrupadas de acuerdo con la procedencia de la zonificación de amenaza, es decir, si procede del estudio básico o si procede de un estudio de detalle, esto porque al proceder del estudio básico, las medidas comprenden principalmente la realización de estudios de detalle ya sea de amenaza o de riesgo (si la zona está ocupada). Si la zonificación proviene de un estudio de detalle quiere decir que ya se desarrollaron los análisis específicos y se tienen las obras que permitirán cambiar la situación actual.

Adicionalmente, las medidas se agruparon de acuerdo con cada subsistema del POT, de manera que se garantizara que los resultados del estudio fueran transversales a la formulación del POT. En el anexo 12 se encuentra la tabla con las medidas definidas, a continuación, se presentan algunas medidas generales:

- En Las áreas con amenaza alta definidas con condición de riesgo (ACR) se deberán ejecutar los estudios de riesgo de detalle si hay presencia de elementos expuestos, de áreas urbanizadas, ocupadas o edificadas, así como de aquellas en las que se encuentren edificaciones indispensables y líneas vitales. Mientras no se realicen los estudios de detalle y las obras que resulten de las mismas no se podrá dar la densificación. En zonas no urbanizadas en amenaza alta (ACA) el desarrollo de estas áreas se condiciona a la elaboración de los estudios detallados, los cuales definirán las medidas estructurales que garantizan la ocupación segura.

- En zonas no urbanizadas en amenaza media el desarrollo de estas áreas se condiciona a la elaboración de los estudios detallados, en suelos urbanos, de expansión o suburbanos.

- Las zonas de amenaza alta y media por inundación para un periodo retorno de 100 años no podrán ser objeto de ocupación; en el caso de intervenciones o adecuaciones para el mejoramiento del espacio público se deberá realizar estudios geológicos, geotécnicos, hidrológicos e hidráulicos. En el caso que se tenga amenaza media y alta por AVT se prohíbe cualquier tipo de ocupación entre tanto no se realicen los estudios de detalle.

- En las zonas que presenten planes parciales para el desarrollo urbanístico del Distrito, la zonificación de amenazas y/o riesgo de estos estudios primará por encima de la amenaza definida en este estudio básico.

- Si se cuenta con zonificación de amenaza resultante de estudios de detalle, la ocupación y las adecuaciones que se vayan a realizar en las zonas de amenaza alta y media por inundaciones, movimientos en masa y avenidas torrenciales, solo se podrán realizar una vez se haga una evaluación prospectiva del riesgo, por cada uno de los eventos, en función del proyecto a ejecutar y se realicen las obras que se propongan de cada uno de estos, garantizando la condición de amenaza baja.

- En cuanto a las zonas con condición de riesgo en áreas de amenaza media, la norma nacional en el parágrafo del artículo 2.2.2.1.3.2.1.5 del mismo Decreto establece que estas se considerarán como áreas con condición de riesgo cuando, en el marco de la revisión o expedición de un nuevo POT, se propongan cambios en la densidad o en los usos del suelo que puedan generar o incrementar el riesgo en la zona. Dado que, en la revisión del mediano plazo, aún no se cuenta con información actualizada sobre las modificaciones de densidad o de uso del suelo, este análisis deberá realizarse posteriormente por el equipo del Sistema de Ocupación para las zonas de amenaza media.

- En las áreas definidas como riesgo alto mitigable resultado de los estudios de detalle, solo se permitirán actuaciones urbanísticas, otorgamiento de licencias de urbanización, construcción, reconocimiento de edificaciones, adecuaciones de espacio público o equipamientos y la prestación de servicios públicos normatizados (convencionales), una vez se hayan ejecutado las obras de mitigación propuestas y los procesos de monitoreo recomendados.

  Previo a la ejecución de las obras de mitigación recomendadas para cada área, se deberá verificar si las condiciones iniciales (geológicas, geomorfológicas, hidrológicas y geotécnicas) se mantienen, de lo contrario se tendría que realizar una actualización a los estudios y diseños de las mismas.

- En las áreas definidas con riesgo no mitigable de los estudios de detalle y aquellas definidas por el Departamento Administrativo de Planeación, no se debe permitir actuaciones urbanísticas, otorgamiento de licencias de urbanización, construcción, reconocimiento de edificaciones, adecuaciones de espacio público o equipamientos, la prestación de servicios públicos normatizados ni el desarrollo de escombreras. Mientras se realizan los procesos de reasentamiento, se podrán implementar obras de mitigación de desastres y prestación de servicios públicos no convencionales temporales (saneamiento básico).

- En las zonas de riesgo alto no mitigable en donde se pretendan realizar proyectos de infraestructura vial, contemplados en el plan vial de la ciudad o que formen parte de proyectos estratégicos de carácter local, regional o nacional, al igual que de servicios públicos de primer orden que se pretendan desarrollar con el fin de dotar a otra zona que no esté caracterizada como con condiciones de riesgo, tales como: torres de energía, estaciones; o estructuras de soporte de infraestructura vial, como pilonas para transporte por cable, se podrán realizar una vez se hayan llevado a cabo los estudios de riesgo de detalle para los proyectos mencionados, los cuales deben determinar las recomendaciones constructivas y las obras de mitigación de estos proyectos, previo concepto del DAGRD y el DAP.

- Las zonas caracterizadas como de alto riesgo no mitigables requieren de programas de reasentamiento, dadas las altas probabilidades de daños y pérdidas como consecuencia de la ocurrencia de movimientos en masa, inundaciones lentas, desbordamientos o avenidas torrenciales.

- En las zonas definidas como de riesgo medio por estudios de detalle, una vez se implementen las recomendaciones y obras resultantes de los estudios, estas podrán ser objeto de adecuaciones urbanísticas, otorgamiento de licencias de urbanización y construcción. En estas zonas se podrán generar reconocimiento de edificaciones, mejoramiento de viviendas, adecuaciones de espacio público o equipamientos y la prestación de servicios públicos convencionales. La implementación o el desarrollo de cualquiera de las actuaciones, deberá cumplir con la norma urbanística establecida en al Acuerdo 48 de 2014 – Plan de Ordenamiento Territorial (POT) y las disposiciones establecidas en la Norma NRS-10, el Acuerdo Metropolitano 09 de 2012 o demás normas que las adicionen, modifiquen o sustituyan. No aplican estas condiciones de manejo para las zonas de riesgo medio por inundaciones y/o avenidas torrenciales, que hagan parte de la faja de retiro de una corriente natural de agua.

- En las áreas de riesgo medio de estudios de detalle, previo a la ejecución de las obras de mitigación recomendadas para cada área de estudio, se debe verificar si las condiciones iniciales (geológicas, geomorfológicas, hidrológicas y geotécnicas) se mantienen, de lo contrario se tendría que realizar una actualización a los estudios y diseños de las mismas.

- En aquellas áreas del Distrito de Medellín, en donde se hayan ejecutado obras tendientes a mitigar el riesgo y/o la amenaza, el DAP determinará cual es el área de influencia directa de las mismas (área mitigada) y así revisar la pertinencia de las ACAs o ACRs obtenidas en el EBA en estas zonas intervenidas.

14 LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Una de las limitaciones principales en el estudio básico de amenaza por inundación y avenidas torrenciales adelantado para el distrito de Medellín consistió en la información geométrica utilizada y que corresponde a un modelo digital del terreno o LIDAR suministrado y con resolución de 1,0 m por 1,0 m y no a un levantamiento topográfico detallado. A pesar de que la superficie permitió visualizar la composición del terreno sobre el área estudiada, para elementos o canales con alta cobertura vegetal, incluyendo zonas con existencia de obras hidráulicas, no se dispuso del detalle específico de estos, sea por el propio levantamiento de la superficie o por el procesamiento y limpieza de los datos. Incluso, en diferentes áreas, se aprecia que el proceso de posprocesamiento de la imagen LIDAR generó zonas de depresión o sumideros que representaron al momento de generar las manchas de inundación, predispusieron el desbordamiento del flujo hacia esas zonas.

Adicionalmente y también con relación a la superficie del terreno, se pudo encontrar algunos tramos con bajo detalle de la sección del canal, la variación o interrupción del ancho efectivo de un drenaje particular, elementos que también permiten o generan que el flujo pueda desbordarse, situación que se buscó corregir y mejorar mediante varios ajustes dentro de la superficie con la finalidad de dar continuidad al flujo, incluyendo el componente de obras hidráulicas existentes.

Es importante aclarar que la simulación hidráulica se realizó a partir del modelo digital de terreno MDT de mayor resolución a la fecha y que el posible desalineamiento entre la zonificación y la red de drenaje obedezca a la variación de la topografía empleada y la red hídrica actual, lo cual podrá incluirse dentro de las limitaciones del estudio. Así mismo, este estudio integró la información de zonificación de amenaza propia y de los resultados de estudios detallados de amenaza, los cuales se soportan en información topográfica de mayor detalle para los tramos analizados, por lo cual no se presenta un acople total entre los polígonos obtenidos.

Gran parte de la zona urbana del Distrito de Medellín presenta el paso de los elementos naturales a través de diferentes obras hidráulicas de gran longitud. Teniendo en cuenta que la base geométrica para el modelo hidráulico desarrollado (imagen LIDAR de 1,0 m por 1,0 m), este tipo de obras no presentaron información detallada, en cuanto a cotas, alineamientos y demás elementos que permitieran apoyar el ingreso dentro del modelo y su posterior análisis. Partiendo de lo anterior, gran parte de la modelación hidráulica fue desarrollada hasta la zona donde inician dichas estructuras en la zona urbana. Solo para casos específicos y donde se logró contar con información topográfica detallada de las obras existentes, fueron ingresadas en la modelación hidráulica, sean como estructuras tipo coberturas - box culverts de sección continua o conectados por cámaras de inspección MH, logrando obtener la amenaza por inundación y avenidas torrenciales en las zonas colindantes con dichas estructuras.

Para las obras hidráulicas puntuales como cruces de vías con puentes o box culvert, estas fueron ajustadas - removidas de la superficie mediante el ajuste del terreno y así permitir la continuidad del flujo evitando que las obras puedan funcionar como diques u obstrucciones dentro del sistema. Este ajuste fue realizado solo para dar la continuidad del canal o sección disponible en un elemento particular, sin contar con información topográfica de detalle para ello.

Dentro la zonificación de la amenaza por inundación para el río Medellín, se tuvo en consideración los resultados disponibles del documento: ESTUDIO DETALLADO DE AMENAZA POR INUNDACIÓN DEL RÍO MEDELLÍN EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE LA CLARA Y LA QUEBRADA LA JABALCONA; ESTUDIO DE SUSCEPTIBILIDAD A LA OCURRENCIA DE AVENIDAS TORRENCIALES EN EL SECTOR AGUAS ARRIBA DE LA CLARA Y, MONITOREO DEL TRAMO CANALIZADO DEL RÍO MEDELLÍN HASTA EL HATILLO EN EL VALLE DE ABURRÁ, desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá en junio de 2022 y ESTUDIO DE AMENAZA POR INUNDACIÓN DEL RÍO MEDELLÍN EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE LA QUEBRADA LA JABALCONA Y EL PUENTE DE LA MADRE LAURA, ASOCIADO A LA VARIACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS POR EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y CAMBIO EN EL USO DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO MEDELLÍN EN EL VALLE DE ABURRÁ, también desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y para octubre de 2023. Finalmente, y para la zona posterior al Puente de La Madre Laura, hasta el límite del Distrito con el municipio de Bello, se complementa con el estudio básico de amenaza de esta corriente y así obtener la zonificación continua de la amenaza por inundación.

Partiendo de estos resultados, se ha optó por asumir como control en la parte inferior de los elementos analizados, los niveles de agua del río Medellín para el permiso de retorno de 10 años, con el fin de garantizar un nivel de creciente para el control en la descarga de los afluentes tributarios que se encuentra por encima de las crecientes ordinarias - recurrentes, sin conllevar a un control excesivo como se puede generar por un nivel en el río para el periodo de retorno de 100 años, que como se obtuvo en los resultados de UNAL, 2022 y 2023, la para la modelación hidráulica del río Medellín se presenta el desbordamiento de grandes áreas sobre la zona urbana del Distrito. Por ello, al obtener la envolvente entre la zonificación de la amenaza por inundación y avenidas torrenciales, se logró representar adecuadamente el fenómeno dentro de la zona estudiada.

El resultado de los estudios básicos de amenaza por inundación y avenidas torrenciales permitieron generar la zonificación de esta dentro del territorio del Distrito de Medellín, esto teniendo en consideración que corresponde a un estudio básico en cumplimiento con Decreto 1807 de 2014, integrado en el Decreto 1077 de 2015, y no un estudio de detalle, por lo cual se presentan los limitantes o aclaraciones indicadas con anterioridad. Por ello, es necesario adelantar estudios de detalle que permitan precisar la zonificación de la amenaza para estos fenómenos. En dichos

procesos, es fundamental contar con el levantamiento topográfico de detalle, ya que gran parte de los drenajes disponibles en el Distrito cuentan con obras hidráulicas que definen el comportamiento del flujo (muros, canales, coberturas, puentes) y que, en definitiva, permitirán estimar una mancha de inundación y avenidas torrenciales, así como su respectiva zonificación que mejore y represente adecuadamente las características de los tramos evaluados.

15 BIBLIOGRAFÍA

- Acuerdo Metropolitano 009 del 2012. *Directrices y lineamientos para la elaboración de estudios* geológicos*, geomorfológicos, hidrológicos, hidráulicos, hidrogeológicos y geotécnicos para intervenciones en zonas de ladera*. Universidad Nacional de Colombia, Universidad EAFIT y Universidad de Medellín, Medellín.
- Alvioli, M., & Baum, R. L. (2016). Parallelization of the TRIGRS model for rainfall-induced landslides using the message passing interface. Environmental Modelling & Software, 122-135.
- Alzate Llano, M. (2015). Análisis de precipitaciones máximas como factor detonante para la amenaza por movimientos en masa en el municipio de Santa Rosa de Cabal, Risaralda. Manizales, Colombia: Universidad de Manizales.
- Área Metropolitana Del Valle De Aburrá – AMVA. (2007). *Microzonificación Sísmica Detallada de los Municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado*.
- Área Metropolitana Del Valle De Aburrá – AMVA. (2011). Plan de Manejo del Área de Recreación Parque Ecológico Cerro Nutibara. Subdirección de Planificación Integral.
- Aristizábal E., Yokota S., Ohira H. & Hagai J., 2004. Dating of slope sediments and alluvial deposits in the Aburra Valley, Colombia. Geoscience Rept. Shimane Univ. 23, pp. 85-88
- Baum, R. L., Savage, W. Z., & Godt, J. W. (2002). TRIGRS - A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis. Reston, EUA: U.S. Geological Survey.
- Baum, R. L., Savage, W. Z., & Godt, J. W. (2008). TRIGRS - A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2.0. Reston, EUA: U.S. Geological Survey.
- Bloom, A. L. (1991). Geomorphology: A systematic analysis of late Cenozoic landforms (3.ª ed.). Prentice Hall.
- Campo, J. M., Múnera, J. C. (1997). Determinación de Tiempos de Concentración y Coeficientes de Escorrentía para Algunas Cuencas de Antioquia. [Tesis de Pregrado. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. 148p]
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (1995). GIS technology in mapping landslide hazard. En A. Carrara, & F. Guzzetti, Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards (págs. 135-175). Dordrecht, Países Bajos: Springer.
- Carvajal, J. (2012). *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Chow, V. T. (1992). Hidráulica de Canales Abiertos. McGraw-Hill, Bogotá, Colombia. 667 p.
- Chow, V. T.; Maidment, D. R., Mays, L. W. (1994). Hidrología aplicada. Bogotá, McGraw-Hill, 583 p.

- Clark, C. O. (1945). Storage and the Unit Hydrograph. Proc. Amer. Soc. Engs. Vol 69. P 1333 – 1360.
- CORANTIOQUIA, Universidad Nacional de Colombia, INGEOMINAS, 2002. Mapa geomorfológico, de amenazas y de áreas degradadas de la jurisdicción de CORANTIOQUIA a escala 1:100.000. Informe Final. Medellín. 143 p.
- Corominas, J., Guzzetti, F., Lan, H., Macciotta, R., Marunteranu, C., McDougall, S., & Strom, A. (2023). Revisiting landslide risk terms: IAEG commission C-37 working group on landslide risk nomenclature. Bulletin of Engineering Geology and the Environment.
- Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018). Actualización POMCA Río Aburrá: Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica, Medellín, Antioquia : Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia.
- Costa, J. E. (1988). Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flows. In V. R. Baker, R. C. Kochel, & P. C. Patton (Eds.), Flood Geomorphology (pp. 113–122). Wiley
- Coussot, P., & Meunier, M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. Earth-Science Reviews, 40(3–4), 209–227.
- Cruden D. M. y D. J. Varnes (1996), "Landslides types and processes", in Turner, A. K. y R. L. Schuster (eds.), Landslides: Investigation and Mitigation, Transportation Research Board, Special Report 247, National Academy Press, Washington, D.C., pp. 36-75.
- Dai, F. C., Lee, C. F., & Xu, Z. W. (2001). Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environmental Geology, 40*(3), 381–391. https://doi.org/10.1007/s002540000163
- Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio. (2015). Decreto Número 1077 de 2015.
- Decreto Número 1807 de 2014, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio
- Deere, D.U., Patton F.D. (1979). *Slope stability in residual soils*. En Proc., Fourth Pan merican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Puerto Rico. Vol. 1, Pág. 87-170.
- Del Toro, N. (2013). Bases y criterios de diseño de canales con flujo escalonado y sujetos a aireación natural. Quito, Ecuador.
- Durán, H., Naranjo, J. A., & Voight, B. (1985). Características de los flujos de detritos asociados a la erupción del Nevado del Ruiz, Colombia. Boletín de Geología, 24(1–3), 45–58
- Empresas Públicas de Medellín - EPM. (2005). Revista hidrometeorológica de Empresas Públicas de Medellín. Departamento de Hidrometría e Instrumentación de EPM.
- Empresas Públicas de Medellín - EPM. (2009). Guía para el diseño Hidráulico de Redes de Alcantarillado. Medellín
- Gabet, E. J., y T. Dunne. (2003). Sediment detachment by rainpower. WaterResour. Res., 39(1), 1002.

- Gardner, W. R. (1958). Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. Soil Science, 228-232.
- Hincapié, A., Velásquez, C., & Monsalve, G. (2018). Evaluación y zonificación de amenaza por avenidas torrenciales en cuencas andinas de Colombia. Servicio Geológico Colombiano
- IDEAM. (2013). Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua. 2013. Bogotá, D.C.
- INGEOMINAS, 2005. Geología de la plancha 146-Medellín Oriental. Bogotá.
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales- IDEAM. (2014). Modelación Hidrológica. Amenaza por inundaciones. Recuperado de http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion. Fecha consulta: 09/01/2018
- Instituto Nacional de Vías -INVÍAS (2006a). Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras. Convenio interadministrativo 058703. Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles. Bogotá: Invías-UNAL.
- Jibson, R. W. (2011). Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes—A retrospective. *Engineering Geology*, 122(1-2):43–50
- Lavigne, F., & Suwa, H. (2004). Contrasts between debris flows, hyperconcentrated flows and stream floods in volcanic environments: Examples from Indonesia, Central America and France. International Journal of Erosion Control Engineering, 57(3), 309–323
- Leroi, E. (1997). Landslide risk mapping. Problems, limitations and developments. En D. Cruden, Landslide Risk Assessment. Londres, Reino Unido: Routledge.
- Maza, J.A. (1987). Ingeniería Hidráulica.
- Maza, J.A., García, M. (1994). Manual de Ingeniería de Rios. Comisión Nacional del Agua, México D.F., 1994.
- Medina, F. (1991). Procesos de remoción en masa en los Andes colombianos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi
- Mejía, G. J., & Posada, L. (2002). Geometría hidráulica para corrientes estables de la Zona Andina Colombiana. En: XV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, 29-31 de agosto, Medellín, Colombia.
- Ministerio De Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial - MAVDT. (2010). NSR-10, Norma Sismo Resistente, R. C. D. C. S. 2010. Bogotá.
- Montoya-Araque, E. A., & Montoya-Noguera, S. (2023). Sensitivity Analysis of a Physically Based Model to Assess Rainfall-Triggered Shallow Landslides. Geotechnical and Geological Engineering, 2797-2814.
- Montoya-Araque, E. A., Lopez-Caballero, F., and Montoya-Noguera, S. (2024b). Using fragility curves in the probabilistic spatial assessment of permanent displacements of slopes. In Proceedings of the 18th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE2024), Milan, Italy.

- Montoya-Araque, E. A., Montoya-Noguera, S., and López-Caballero, F. (2024a). An open-source application software for spatial prediction of permanent displacements in earthquake-induced landslides by the Newmark sliding block method: pyNewmarkDisp. Environmental Modelling & Software, 173:105942.
- Montoya-Araque, E. A., Montoya-Noguera, S., Lopez-Caballero, F., and Gatti, F. (2025). Numerical earthquake-induced landslide hazard assessment at regional scale in the Colombian Andes. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 195: 109370.
- Ordoñez Carmona, O., Valencia Marín, M., González Iregui, H., Cañola Herrera, E., Ruiz, M., Rendón Ramírez, A. (2005). *Generalidades del sistema de fallas de Romeral en las cercanías a Medellín*.
- Ordoñez, J.I. (2005). El régimen de los ríos aluviales y sus implicaciones sobre la socavación general. Segundo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos.
- Parra, H. (1998). Evaluación de amenazas por movimientos en masa en la cuenca del río Combeima. Servicio Geológico Colombiano
- Parra, H., Martínez, J., & Rodríguez, D. (1995). Estudio geológico y de amenazas por procesos de remoción en masa en áreas montañosas de Colombia. Servicio Geológico Colombiano
- Piedrahíta, L. (1996). Movimientos en masa en zonas andinas de Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi
- Posada, J. E. (1998). Determinación del Coeficiente de Rugosidad en Canales Naturales. [Trabajo Dirigido de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas]. Medellín. 74p.
- Posada, L. E. (1994). Transporte de Sedimentos. [Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín].
- Rathje, E. M. (2025). Evolution of Approaches to Evaluate the Seismic Performance of Earth Slopes. *Indian Geotechnical Journal*
- Rendón, D. A., 2003. Tectonic and sedimentary evolution of the upper Aburrá Valley, northern Colombian Andes. Master thesis Shimane University. Japan. 124 P.
- Rendon, et al, 2006. Modelo cronoestratigráfico para el emplazamiento de los depósitos de vertiente en el Valle de Aburrá, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Rennó 2008 seria esta referencia: Rennó, C. D., Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Soares, J. V., Hodnett, M. G., Tomasella, J., & Waterloo, M. J. (2008). HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. Remote Sensing of Environment, 112(9), 3469-3481. https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.018
- Rivas, y Soto (2009). Determinación de niveles de potencialidad torrencial de la cuenca del río Mocotíes, Mérida, Venezuela. Revista Forestal Venezolana, Año XLIII, Volumen 53(1) Enero-junio, 2009, pp. 33-4.
- S. Noriega-Londoño, et al, 2021. "Cronoestratigrafía del Valle de Aburrá, Colombia: una revisión" Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo, vol. 21 (2), pp.23-34.

- Servicio Geológico Colombiano - SGC. (2015). Guía metodológica para estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por movimientos en masa, escala detallada. Colección Guías y Manuales. 179p.
- Servicio Geológico Colombiano - SGC. (2012). Propuesta de estandarización para la cartografía geomorfológica en Colombia. Bogotá.
- Servicio Geológico Colombiano - SGC. (2021). Guía metodológica para zonificación de amenazas por avenidas torrenciales. Colección Guías y Manuales. 240p.
- SGC y Universidad EAFIT, 2014. MEMORIA EXPLICATIVA MAPA GEOMORFOLÓGICO APLICADO A MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1:100.000, PLANCHA 147 – MEDELLÍN ORIENTAL. Medellín.
- SGC. (2016). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Bogotá, D.C., Colombia: Servicio Geológico Colombiano.
- SGC. (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. Bogotá, D. C., Colombia: Servicio Geológico Colombiano.
- Smith y Vélez. (1997). Hidrología de Antioquia. Secretaria de Obras Públicas del Municipio de Medellín y Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Snyder, F. (1938). Synthetic unit hydrographs. Trans Am Geophysics Union, 19, 447–54
- Soeters, R., & van Westen, C. J. (1996). Slope instability recognition, analysis, and zonation. En A. K. Turner, & R. L. Schuster, Landslides, investigation and mitigation (págs. 129-177). Washington, D.C., EUA: National Academy Press.
- Suárez D, J. (2001). *Control de erosión en zonas tropicales, Colombia*. Universidad Industrial de Santander, pp. 168.
- Tarboton, D. G. (1997). *A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models*, p 309 - 319
- Témez, J. R. (1978). Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. España: Dirección General de Carreteras-MOPU.
- Thiery, Y., Terrier, M., Colas, B., Fressard, M., Maquaire, O., Grandjean, G., & Gourdier, S. (2020). Improvement of landslide hazard assessments for regulatory zoning in France: STATE-OF-THE-ART perspectives and considerations. International Journal of Disaster Risk Reduction.
- Turner. H.M., y Burdoin, A. J. (1941). The flood hydrograph. Journal of the Boston Society of Civil Engineers, vol 28, no 3, p 232 – 281
- U.S Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center. (2016). HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual.
- U.S Army Corps Of Engineers – Hydrologic Engineering enter. (2002a). HEC-RAS river
- U.S Army Corps Of Engineers – Hydrologic Engineering enter. (2002b). HEC-RAS
- U.S Army Corps Of Engineers – Hydrologic Engineering enter. (2010). HEC-RAS

- Universidad Nacional De Colombia - UNALMED, Área Metropolitana Del Valle De Aburrá - AMVA, Corporación Autónoma Regional del Centro De Antioquia - CORANTIOQUIA y Corporación Autónoma Regional Rionegro y Nare - CORNARE. (2007). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca (POMCA) del Río Aburrá.
- Universidad Nacional De Colombia, Corporación Autónoma Regional del Centro De Antioquia - CORANTIOQUIA, Instituto Mí Río. (2003). Metodología para la formulación de Planes Integrales de Ordenamiento y Manejo de Cuencas (PIOM)
- Universidad Nacional De Colombia, sede Medellín – UNALMED. (2010). HidroSIG 4.0. Manual de Usuario. Recuperado de https://minas.medellin.unal.edu.co/departamentos/geocienciasymedioambiente/hidrosig/es/hidrosig-4-0.html. Fecha consulta: 09/01/2018
- Van Westen, C. J. (1993). Application of Geographic Information Systems to landslide hazard zonation. Enshede, Países Bajos: International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC).
- Van Westen, C. J., Rengers, N., & Soeters, R. (2003). Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment. Natural Hazards, 399-419.
- Van Westen, C. J., van Asch, T. W., & Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation - why is it still so difficult? Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 167-184.
- Vélez, J.J., y Botero, A. (2010). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental.