



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**GEOMORFOLOGÍA Y DINÁMICA FLUVIAL PARA
EL ANÁLISIS DE AMENAZA POR INUNDACIONES
EN LA ZONA DE CONFLUENCIA DE LOS RÍOS
SUMAPAZ Y MAGDALENA, RICAURTE-
CUNDINAMARCA**

RICHARD JENS DUQUE OLIVA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Facultad de Ciencias

Departamento de Geociencias

Bogotá D.C.

Noviembre de 2019

**GEOMORFOLOGÍA Y DINÁMICA FLUVIAL PARA EL ANÁLISIS DE
AMENAZA POR INUNDACIONES EN LA ZONA DE CONFLUENCIA DE LOS
RÍOS SUMAPAZ Y MAGDALENA, RICAURTE-CUNDINAMARCA.**

Trabajo de grado para optar al título de Maestría en Ciencias de la Tierra

Por:

RICHARD JENS DUQUE OLIVA

Director:

PROF. JUAN MANUEL MORENO MURILLO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Programa de Postgrado en Geociencias

Bogotá D.C.

Noviembre de 2019

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la sabiduría, paciencia y disciplina para poder culminar la maestría.

A mis Padres, Esposa, Hijos y a mi Hermano Jair, por el sacrificio que realizaron durante mis estudios y por ser el motor de mi vida.

Al profesor Juan Manuel Moreno, profesor asociado de la Universidad Nacional de Colombia - sede Bogotá, quien con sus conocimientos, dirección y apoyo contribuyeron a mi formación académica y al desarrollo de este trabajo.

Por sus aportes académicos, a los geólogos Julio Guerra y Wilfer Huertas.

Finalmente quiero agradecer a cada uno de mis familiares y amigos por el apoyo que con agrado siempre demostraron.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	17
1.1.	Objetivo General	17
1.2.	Objetivos Específicos	17
1.3.	Justificación	18
1.4.	Localización y extensión	19
2.	METODOLOGÍA	20
2.1.	Dinámica fluvial	20
2.2.	Herramientas geomáticas	24
2.2.1.	Fotografías aéreas	25
2.2.2.	Representación de tridimensional del terreno	27
2.2.2.1.	Adquisición de información topográfica	27
2.2.2.2.	Modelo TIN con sombras	29
2.2.2.3.	Modelo de Sombras	29
2.2.2.4.	Pendiente	30
2.3.	Control de Campo	31
3.	GEOLOGÍA	33
3.1.	Geología Regional	33
3.2.	Geología Específica	35
3.3.	Unidades Estratigráficas	36
3.3.1.	Grupo Olini (Kso)	36
3.3.2.	Formación La Tabla (Kslt)	37
3.3.3.	Formación Barzalosa (Pgba)	38
3.3.4.	Grupo Honda (Ngh)	39
3.3.5.	Terrazas altas (Qta)	41
3.3.6.	Abanico el Espinal (Qae)	42
3.3.7.	Cuaternario aluvial (Qal)	42
4.	SEDIMENTOLOGÍA	43
4.1.	Procesos Fluviales	43

4.1.1.	Sistemas trenzados	44
4.1.2.	Sistemas meándricos	46
4.1.3.	Sistemas anastomosados	48
4.1.4.	Sistemas de abanicos aluviales	49
4.2.	Cuenca del río Magdalena	51
4.3.	Cuenca del río Sumapaz	54
4.4.	Análisis Sedimentológico	55
4.5.	Análisis morfoestructural	59
4.5.1.	Perfiles del terreno	65
5.	GEOMORFOLOGÍA	67
5.1.	Unidades geomorfológicas.	67
5.1.1.	Ambiente Denudacional	68
5.1.1.1.	Cerro remanente o relictos (Dcrem)	68
5.1.1.2.	Escarpe de erosión menor (Deeme)	69
5.1.1.3.	Lomeríos disectados (Dldi)	69
5.1.1.4.	Montículo y ondulaciones denudacionales (Dmo)	70
5.1.2.	Ambiente fluvial	71
5.1.2.1.	Cauce aluvial (Fca)	71
5.1.2.2.	Laguna (Flg)	71
5.1.2.3.	Plano o llanura de inundación (Fpi)	72
5.1.2.4.	Terraza de acumulación (Fta)	72
5.1.2.5.	Escarpe de terraza de acumulación (Ftae)	73
5.1.2.6.	Terraza de acumulación antigua (Ftan)	73
5.1.2.7.	Terraza de acumulación sub-reciente (Ftas)	74
5.1.3.	Ambiente Estructural	74
5.1.3.1.	Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal (Sshlc)	74
5.1.3.2.	Ladera estructural de sierra homoclinal (Sshle)	74
5.1.4.	Ambiente Antropogénico	74
5.1.4.1.	Canteras (Ac)	74
6.	DINÁMICA FLUVIAL	75
6.1.	Análisis multitemporal	75

6.2.	Análisis Imagen Landsat	91
6.2.1.	Índice de humedad	92
7.	EVALUACIÓN AMENAZA POR INUNDACIÓN	97
7.1.	Metodología	97
7.2.	Resultados	97
7.2.1.	Escenarios de inundación	97
7.2.2.	Mapa de amenaza por inundación	107
8.	RECOMENDACIONES	115
9.	CONCLUSIONES	120
	DISCUSION	
	BIBLIOGRAFÍA	122

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización, municipio de Ricaurte. Fuente: Propia adaptada ArcGIS 10.2 (2018).	19
Figura 2. Índices de Sinuosidad para ríos y morfología de los cauces (Boggs 1985).	22
Figura 3. Modelo digital de elevación para la zona de estudio total. (Fuente propia).	29
Figura 4. Modelo de sombras. Fuente propia.	30
Figura 5. Zonificación de Pendientes del Área de estudio. Fuente propia.	31
Figura 6. Puntos de control de campo sobre las áreas de interés. Ortoimagen IGAC 2015 de la zona de estudio. Se indican los recorridos del área de estudio con los puntos verdes y puntos de la toma de muestras para tamizaje con los triángulos.	32
Figura 7. Plancha 245 - Girardot, escala 1:100.000, donde se muestra el área de estudio (recuadro en negro). Tomado de Acosta et al. (1999).	34
Figura 8. Fragmento de la Plancha 245 – Girardot de Acosta et al. (1999), donde se muestra el área de estudio (recuadro en negro). Destacan principalmente las unidades cuaternarias correspondientes al abanico de Espinal y depósitos aluviales además del Grupo Honda.	34
Figura 9. Unidades geológicas presentes en la zona de estudio. Fuente: propia.	35
Figura 10. Perfil de sistemas fluviales. Tomado de Shumm (1981).	44
Figura 11. Tipos de barras en ríos trenzados. Tomado de Galloway & Hobday (1983)	45
Figura 12. Esquema de un sistema meándrico. Tomado y adaptado Boggs (1987).	46
Figura 13. Sistema meándrico en la fase madura del río Sumapaz. Fotografía C-686,1954.	48
Figura 14. Representación esquemática de un abanico aluvial desarrollado en un valle suizo. Aspecto general (A) donde se aprecia la diversificación del canal principal. Sección radial (B) en la que se manifiesta la distribución general de la granulometría de los clastos (font i Saguè, 1905).	49
Figura 15. Fotografía aérea de la desembocadura del río Sumapaz, enero 1954. Comparación de la dinámica fluvial de los meandros y sus depósitos sedimentarios con estructuras de estratificación cruzada. Localización de la sección actual del río A-B m (foto C-686, 1954. Diagrama tomado y modificado Miall 1985).	58
Figura 16. Perfil transversal del río Sumapaz. Imagen izquierda: Fotografía de campo para el grupo Honda. Imagen superior derecha: Vista de planta con ubicación del perfil. Imagen inferior derecha: Vista de perfil.	61
Figura 17. Perfiles sobre el terreno en vista de planta. Ortoimagen IGAC 2015	65

Figura 18. Perfil Área del barrio Villa Carolina. Fuente propia.....	65
Figura 19. Perfil Área del Condominio Puerto Peñalisa. Fuente propia.	66
Figura 20. Unidades geomorfológicas presentes en la zona de estudio (barrio Villa Carolina, Puerto Peñalisa, barrio San Martin). Fuente propia.....	68
Figura 21. Foto georrefenciada, vuelo C-24/1940. Fuente propia.	76
Figura 22. Foto georrefenciada, Vuelo C-24/1940, con la infraestructura actual. Fuente propia.....	76
Figura 23. Interpretación fotografía 609 vuelo C-24, año 1940, zona de estudio. Fuente propia.....	77
Figura 24. Foto georrefenciada, Vuelo C-24/1942, con la infraestructura actual. Fuente propia.....	78
Figura 25. Interpretación fotografía 246 vuelo C-143, año 1942, zona de estudio. Fuente propia.....	78
Figura 26. Foto georrefenciada, Vuelo C-686, año 1954. Fuente propia.	79
Figura 27. Foto georrefenciada, Vuelo C-686, año 1954, con la infraestructura actual. Fuente propia.....	80
Figura 28. Interpretación fotografía 032 vuelo C-686, año 1954, zona de estudio. Fuente propia.....	81
Figura 29. Foto georrefenciada, Vuelo R-632, año 1967. Fuente propia.	82
Figura 30. Fotos georrefenciadas, Vuelo R-632, año1967, con la infraestructura actual. Fuente propia.....	83
Figura 31. Interpretación fotografías 144, 059,195 vuelo R-632, año 1967. Fuente propia.	83
Figura 32. Foto georrefenciada, Vuelo R801/075, con infraestructura actual. Fuente propia.	84
Figura 33. Interpretación fotografía 075 vuelo R-801, año 1981, zona de estudio. Fuente propia.....	85
Figura 34. Foto georrefenciada, Vuelo R-929, año 1983, con infraestructura actual. Fuente propia.....	86
Figura 35. Interpretación fotografía 162 vuelo R-929, año 1983, zona de estudio. Fuente propia.....	87
Figura 36. Ortoimagen IGAC zona de estudio, año 2015.	88
Figura 37. Representación multitemporal de los cauces de los ríos Magdalena y Sumapaz dentro de la zona de estudio para el periodo comprendido entre los años 1940 – 1954. Ortoimagen IGAC 2015.	89

Figura 38. Representación multitemporal de los cauces de los ríos Magdalena y Sumapaz dentro de la zona de estudio para el periodo comprendido entre los años 1954 – 1967. Ortoimagen IGAC 2015.	89
Figura 39. Representación multitemporal de los cauces de los ríos Magdalena y Sumapaz dentro de la zona de estudio para el periodo comprendido entre los años 1967 – 1983. Ortoimagen IGAC 2015.	90
Figura 40. Representación multitemporal de los cauces de los ríos Magdalena y Sumapaz dentro de la zona de estudio para el periodo comprendido entre los años 1940 – 2015. Ortoimagen IGAC 2015.	90
Figura 41. Leyenda del Multitemporal de cauces. Fuente propia.	91
Figura 42. Imagen de satélite donde se muestra todos los cauces a lo largo del tiempo. Ortoimagen IGAC 2015.	91
Figura 43. Imagen Landsat año 1977. Fuente: Imágenes procesadas y adaptadas; Software ERDAS, Arcgis 10.2).	93
Figura 44. Imagen Landsat año 1985. Fuente: Imágenes procesadas y adaptadas; Software ERDAS, Arcgis 10.2.	94
Figura 45. Imagen Landsat año 1991. Fuente: Imágenes procesadas y adaptadas; Software ERDAS, Arcgis 10.2.	94
Figura 46. Imagen Landsat año 2000. Fuente: Imágenes procesadas y adaptadas; Software ERDAS, Arcgis 10.2.	95
Figura 47. Imagen Landsat 2011. Fuente: Imágenes procesadas y adaptadas; Software ERDAS, Arcgis 10.2.	95
Figura 48. Imagen Landsat año 2015. Fuente: Imágenes procesadas y adaptadas; Software ERDAS, Arcgis 10.2.	96
Figura 49. Modelo de inundación zona de estudio, niveles base promedio Ríos Magdalena y Sumapaz. Fuente propia.	98
Figura 50. Modelo de inundación zona de estudio, niveles base promedio Ríos Magdalena y Sumapaz, nivel +2 metros. Fuente propia.	99
Figura 51. Modelo de inundación zona de estudio, niveles base promedio Ríos Magdalena y Sumapaz, nivel +4 metros. Fuente propia.	100
Figura 52. Modelo de inundación zona de estudio, niveles base promedio Ríos Magdalena y Sumapaz, nivel +6 metros. Fuente propia.	101
Figura 53. Modelo de inundación zona de estudio, niveles base promedio Ríos Magdalena y Sumapaz, nivel +8 metros. Fuente propia.	102
Figura 54. Modelo de inundación zona de estudio, niveles base promedio Ríos Magdalena y Sumapaz, nivel +10 metros. Fuente propia.	103

Figura 55. Modelo de inundación zona de estudio, niveles base promedio Ríos Magdalena y Sumapaz, nivel +12 metros. Fuente propia.	104
Figura 56. Modelo de inundación zona de estudio, niveles base promedio Ríos Magdalena y Sumapaz, nivel +14 metros. Fuente propia.	105
Figura 57. Modelo de inundación zona de estudio, niveles base promedio Ríos Magdalena y Sumapaz, nivel +16 metros. Fuente propia.	106
Figura 58. Zonificación de amenaza para el área de estudio. Fuente propia.....	109
Figura 59. Zonificación de amenaza por inundación con infraestructura 2015. Fuente propia.	110
Figura 60. Esquema de una sección transversal generalizada de un río. Tomado de Nelson 2016, Tulane University.	112

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Estación Total Topográfica Topcon GTS 236W y Tipo de Prismas utilizados en levantamiento topográfico.	28
Fotografía 2. Levantamiento topográfico con estación. Arriba: Sector Barrio Villa Carolina.	28
Fotografía 3. Capas delgadas (3 a 10 cm) de liditas pertenecientes al Grupo Olini sector de San Martín, debajo del puente. Fuente propia.	37
Fotografía 4. Rocas estratificadas en capas delgadas (3 a 10 cm) a gruesas (30 a 100 cm) de areniscas compactas pertenecientes a la Formación La Tabla, Sector Callejones. (Fuente propia).	38
Fotografía 5. Areniscas masivas, friables, color crema asociadas a la Formación Barzalosa, sector el Ciruelo. Fuente propia.	39
Fotografía 6. Areniscas masivas, color crema a gris verdoso, asociadas con el Grupo Honda, sector condominio San Marcos. Fuente propia.	40
Fotografía 7. Areniscas masivas, color crema, asociadas con el Grupo Honda, sector condominio Puerto Peñalisa, Río Sumapaz. Fuente propia.	41
Fotografía 8. Identificación de sedimentos asociados con llanuras de inundación, sector Barrio Villa Carolina. (Fuente propia).	43
Fotografía 9. Depósitos conglomeráticos desde tamaño grava a bloques (>40cm) en la base del río Magdalena sobre rocas del Grupo Honda.	53
Fotografía 10. Depósitos de terraza en el costado occidental del río Magdalena en el área de barrio Villa Carolina. Predominan las arenas de tamaño fino, limos y arcillas.	54
Fotografía 11. Identificación de sedimentos y estructuras asociadas con llanuras de inundación, sector Barrio Villa Carolina.	55
Fotografía 12. Identificación de sedimentos y estructuras asociadas con llanuras de inundación, sector Barrio Villa Carolina.	56
Fotografía 13. Identificación de sedimentos y estructuras asociadas con pulsos de inundación, diferenciación del sorteamiento de la granulometría, sector el Cádiz, Puerto Peñalisa.	57
Fotografía 14. Sección A-B. Afloramiento de terrazas depositadas por el río Sumapaz en el año 1954 (Figura 15), presencia de estructuras sedimentarias de estratificación cruzada y el paleocanal del río.	58
Fotografía 15. Identificación morfoestructural, reconocimiento de diferentes niveles de terrazas asociadas al río Sumapaz.	60
Fotografía 16. Identificación morfoestructural, reconocimiento de diferentes niveles de terrazas.	62

Fotografía 17. Identificación morfoestructural, reconocimiento de cárcavas por socavación.	63
Fotografía 18. Identificación morfoestructural río Magdalena. Reconocimiento de terraza primaria.....	63
Fotografía 19. Identificación morfoestructural río Magdalena. Cauce actual, cauce normal (gravas) y terrazas primaria y secundaria.	64
Fotografía 20. Identificación morfoestructural diferentes niveles de terrazas aluviales. (Barrio Villa Carolina).....	64
Fotografía 21. Vista frontal sector Loma Gorda donde se observa las unidades Cerro remanente o relicto (Dcrem) y Terraza de acumulación antigua (Ftan). Fuente propia.....	69
Fotografía 22. Unidad lomerios disectados (Dldi), desarrollada por acción denudacional de quebradas y aguas de escorrentía, sitio condominio San Marcos, municipio de Ricaurte, foto tomada al NE del municipio. Fuente propia.	70
Fotografía 23. Unidad Montículos y ondulaciones denudacionales (Dmo), sector El Tesoro. Fuente propia.	71
Fotografía 24. Unidad llanura de Inundación, desarrollada por acción del río Sumapaz en el sitio El Paso, Municipio de Ricaurte, se observan depósitos del río (arenas), extracción de material artesanalmente. (Fuente propia).	72
Fotografía 25. Unidad Terraza de acumulación antigua (Ftan), veredas San Francisco y El Pozo. Fuente propia.	73
Fotografía 26. Unidad canteras (Ac), Unidad ladera de contrapendiente de sierra homoclinal (Sshlc), unidad Lomeríos Disectados (Dldi), vereda El Paso, Vía Girardot – Melgar. Fuente propia.	75
Fotografía 27. Registro de las alturas alcanzadas por el nivel del agua durante las inundaciones en 2008 y 2011 respectivamente, marcadas por una línea azul.....	107
Fotografía 28. Terraza de Inundación, donde se observan 3 niveles de terrazas teniendo en cuenta los cambios de granulometría de cada depósito desarrollado por acción del río Sumapaz en el sitio El Paso, Municipio de Ricaurte.	113
Fotografía 29. Terraza de Inundación río Sumapaz perteneciente al lecho mayor, sector San Martín, Municipio de Ricaurte, se observan zonas con construcciones civiles.	114
Fotografía 30. Zona de asentamientos ilegales sobre la terraza de inundación. Sector San Martín.	115
Fotografía 31. Zona de asentamientos ilegales sobre la terraza de inundación. Sector San Martín.	116
Fotografía 32. Ampliación de cauce, Foto tomada de: http://ingedeca.es	117
Fotografía 33. Obra de un Dique para evitar inundaciones. Imagen tomada de: https://www.catamaractual.com.ar	118

Fotografía 34. Canalización de los ríos Amarillo y Fogótico en la ciudad de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México. Imagen tomada de: <https://www.researchgate.net>..... 119

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Líneas de vuelo empleadas en el estudio.....	25
Tabla 2. Área de drenaje y las principales características climáticas e hidrográficas de las zonas en las que se divide el río Magdalena.....	52

ANEXOS

ANEXO 1

MAPA GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO. ESCALA 1:2000.

ANEXO 2

MAPA GEOMORFÓLOGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO. ESCALA 1:2000.

ANEXO 3

MAPA MULTITEMPORAL DE DINÁMICA FLUVIAL. ESCALA 1:2000

ANEXO 4

MAPA DE AMENAZA POR INUNDACIÓN PARA LA ZONA DE ESTUDIO. ESCALA 1:2000.

ANEXO 5

TERMINOLOGÍA

ANEXO 6

HIDROLOGÍA Y TRATAMIENTO ESTADISTICO

RESUMEN

El municipio de Ricaurte en el departamento de Cundinamarca presenta aumento en los niveles de los ríos circundantes, especialmente en su área urbana limítrofe, donde se ubican asentamientos no planificados, y conjuntos residenciales a lo largo de la ronda de los ríos Magdalena y Sumapaz. Estos ríos, según datos recopilados, han generado varios eventos de inundación en épocas de altas precipitaciones, sobre áreas urbanizadas tales como los barrios Villa Carolina y San Martín, además del condominio Puerto Peñalisa.

Estas áreas se encuentran sobre la zona de confluencia de los ríos Sumapaz y Magdalena; área que presenta evidencias morfológicas históricas de procesos morfodinámicos de dinámica fluvial muy activa, que, durante distintos periodos de tiempo, ha moldeado geoformas de génesis aluvial.

En este trabajo se busca integrar información base de diferentes fuentes, para dar paso a la construcción de un modelo que pueda ser empleado como instrumento primario en la comprensión de la amenaza por inundación asociada a la dinámica natural de los cuerpos hídricos en épocas de altos caudales.

Palabras clave: geomorfología, dinámica fluvial, SIG, multitemporal, inundaciones.

ABSTRACT

The municipality of Ricaurte in the Department of Cundinamarca has increased the levels of the surrounding rivers, especially in the bordering urban area, where unplanned settlements and residential complexes are located along the Magdalena and Sumapaz rivers. These rivers, according to the data collected, have generated several flood events, in times of high winter, over urbanized areas such as Villa Carolina and San Martin neighborhoods, as well as the Puerto Peñalisa condominium.

These areas are located on the confluence zone of the Sumapaz and Magdalena rivers, which presents historical morphological evidence of morphodynamic processes of very active fluvial dynamics during different periods, to a situation that has molded geoforms of alluvial genesis.

In this work, we seek to integrate base from different sources to make the construction of a useful model as a primary instrument in the understanding of flood associated with the natural dynamics of water bodies in times of high flows.

Keywords: Geomorphology, fluvial dynamics, GIS, multitemporal, floods.

1. INTRODUCCIÓN

Entendiendo que en Colombia algunas áreas pobladas se encuentran en riesgo por diferentes eventos naturales, el Estado colombiano ha implementado una reglamentación para la gestión del riesgo de desastres, con el fin de garantizar que el desarrollo de los territorios sea ordenado y seguro, salvaguardando la integridad de la población y la infraestructura.

Conforme lo anterior, el artículo 39 de la Ley 1523 de 2012 establece que los planes de ordenamiento territorial deberán integrar el análisis del riesgo con base en los componentes biofísico, económico y socio ambiental, y considerando las amenazas por inundaciones como un condicionante para el uso y la ocupación del territorio, se procura evitar la configuración de nuevas condiciones de riesgo.

Dada la problemática que representan los eventos de inundación por sus efectos sobre la población y sus bienes, este trabajo pretende contribuir al conocimiento del riesgo, a través de la evaluación de la amenaza a un nivel detallado, en una municipalidad del departamento de Cundinamarca que dada su posición geográfica se encuentra bajo la influencia de los ríos Magdalena y Sumapaz.

El presente estudio busca generar un modelo base de dinámica fluvial para inundaciones y generar mapas de zonificación de amenaza para un área específica del municipio de Ricaurte–Cundinamarca, afectado históricamente por este tipo de eventos durante las épocas del aumento de caudal de los ríos Magdalena y Sumapaz, para así identificar los posibles daños en las viviendas e infraestructura local, junto con las pérdidas humanas y económicas que derivan de los mismos. Este modelo busca ser una herramienta para el análisis de la dinámica fluvial y una contribución para la geología y los estudios de amenaza por procesos naturales.

1.1. Objetivo General

- Definir los procesos que han generado cambios morfodinámicos en la llanura aluvial deltaica del río Sumapaz, en la confluencia con el río Magdalena, por medio de un estudio multitemporal de dinámica fluvial que integra la información proveniente de sensores remotos, permitiendo establecer una metodología de investigación aplicable a ríos de llanuras aluviales similares, para identificar la amenaza asociada a inundaciones.

1.2. Objetivos Específicos

- Establecer una base de datos de información geológica, estratigráfica, litológica, estructural y de dinámica fluvial a partir de la bibliografía consultada y los datos obtenidos por medio de fotointerpretación de sensores remotos.

- Identificar y caracterizar las zonas propensas a presentar afectaciones por inundaciones derivadas de la dinámica fluvial natural.
- Determinar las medidas específicas para la mitigación de la amenaza.
- Generar un mapa geomorfológico específico local del área de estudio a escala 1:2000.
- Construir un modelo evolutivo que permita reconstruir el comportamiento histórico del sistema fluvial asociado a los afluentes ubicados en el área de la desembocadura del río Sumapaz mediante la integración y análisis morfodinámico de los datos disponibles.

1.3. Justificación

Entendiendo la problemática actual que enfrenta la población frente a la materialización de escenarios de riesgo a causa de diferentes fenómenos, en especial aquellos asociados a eventos de origen hidrometeorológico, las inundaciones se han caracterizado en el país por su frecuencia y el elevado número de personas y áreas afectadas. La municipalidad de Ricaurte, en el departamento de Cundinamarca, no es ajena a esta problemática y los barrios Villa Carolina, San Martín, y el condominio Puerto Peñalisa debido a su localización se encuentran bajo la influencia de los ríos Sumapaz y Magdalena, por lo que un estudio detallado que, de cuenta del grado de amenaza sobre estos sectores a causa de las crecientes de estos cauces, es una herramienta valiosa para el desarrollo seguro y ordenado del territorio.

Bajo este panorama, las diferentes disciplinas del conocimiento han abordado desde sus saberes y experiencias, diferentes aproximaciones que permitan establecer el área de potencialmente afectada por los eventos de inundación, por lo que la geología y sus métodos o aproximaciones para resolver problemas, permiten aportar nuevos elementos al conocimiento del riesgo mediante la integración de trabajo de campo, fotografías aéreas y el análisis e integración de esta información en un entorno SIG (Sistema de Información Geográfico).

Este trabajo encuentra una oportunidad para aportar desde el conocimiento geológico una aproximación o metodología alternativa a los métodos de zonificación convencional donde se puede tener en cuenta los elementos topográficos y evidencia geomorfológica para establecer el grado de afectación por los eventos de crecientes y con ello servir de guía para otras zonas del país, con el fin de dar luces para un desarrollo seguro y sostenible.

1.4. Localización y extensión

El municipio de Ricaurte se encuentra dentro de las coordenadas $4^{\circ} 17' 20''$ de latitud Norte y $74^{\circ} 47' 70''$ de longitud Oeste del Meridiano de Greenwich, en la provincia del Alto Magdalena. Su altitud ha sido medida en 284 metros sobre el nivel del mar

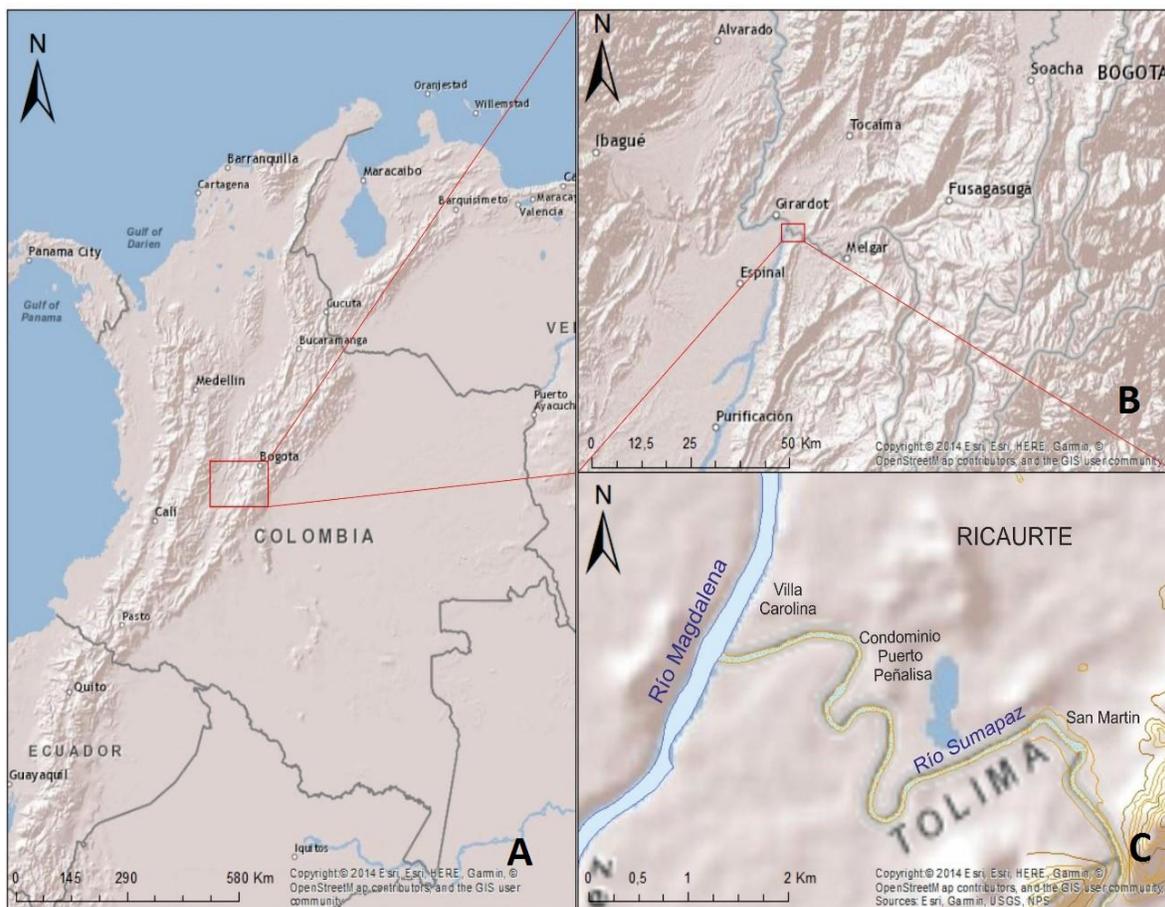


Figura 1. Localización, municipio de Ricaurte. Fuente: Propia adaptada ArcGIS 10.2 (2018).

En figura 1, la imagen **A**, se observa la zona de estudio ubicada en Colombia (recuadro rojo), en la imagen **B**, se detalla el sector de trabajo en el municipio de Cundinamarca (recuadro rojo), en la imagen **C**, se muestra la zona de estudio específica la cual comprende los barrios San Martín, Condominio multifamiliar Puerto Peñalisa y Villa Carolina; para este último, específicamente sobre el sitio donde desemboca el río Sumapaz en el Río Magdalena.

2. METODOLOGÍA

En este trabajo se busca integrar información base de diferentes fuentes, para dar paso a la construcción de un modelo que pueda ser empleado como instrumento base en la comprensión de la amenaza por inundaciones asociada a la dinámica natural de los cuerpos hídricos en épocas de altos caudales. Para lograr la generación del modelo mencionado es necesaria la implementación de tres herramientas fundamentales, las cuales son:

- Análisis SIG
- Trabajo de campo
- Recopilación de información bibliográfica

El análisis SIG se procede a realizar en información extraída de diferentes fuentes como lo son las fotografías aéreas y las imágenes satelitales. Por medio de estas se puede generar un modelo multitemporal que describa el comportamiento de los afluentes involucrados directamente en el área de estudio durante las últimas décadas. A partir de la descripción, la superposición de imágenes y análisis comparativo de todos los parámetros de estudio de las fotos, se obtiene un producto con el cual, se generó el mapa de amenaza por inundación.

El trabajo de campo se realizó para corroborar la información recolectada por medio de los sensores remotos. Asimismo, se estudió detalladamente la geología de la zona haciendo énfasis en los asentamientos urbanos más propensos a fenómenos de inundación en temporadas de aumento de caudales.

La recopilación de información bibliográfica incluyó documentos y mapas de la región, los cuales se convirtieron en un insumo fundamental para las etapas posteriores del estudio. Con las herramientas mencionadas se desarrolla la zonificación de amenaza por inundación, representada por medio de mapas geomorfológicos a una escala superior a 1:2000.

Finalmente, se realizó una interpolación entre las zonas de amenaza y las que poseen viviendas y/o infraestructura, para así generar el modelo de amenaza por inundaciones para los barrios Villa Carolina, San Martín y el condominio Puerto Peñalisa en Ricaurte – Cundinamarca.

A continuación, se exponen los principales referentes metodológicos que fueron tenidos en cuenta para el desarrollo de la presente investigación, así como para el alcance de los objetivos propuestos.

2.1. Dinámica fluvial

Se considera dinámica fluvial al proceso mediante el cual, la acción de los ríos alcanza una migración lateral dentro de su llanura aluvial. Ocasionalmente cuando sobrepasa los niveles máximos en su canal inunda las terrazas que lo bordean (avulsión).

Los sistemas hídricos se ajustan permanentemente en el espacio y el tiempo debido a su génesis, origen y evolución de la geomorfología (ver Figura 2). Además del cauce o cauces principales, las zonas inundables tienen una red de cauces y caños que atraviesan los diques conectando el río principal con los pantanos y los lagos formados por meandros abandonados.

Estos cauces pueden retener o no el agua durante todo el año, pero constituyen el camino principal de retorno del cauce, posterior a esto durante los periodos iniciales de crecidas, el agua puede retomar sus caminos de desembocadura.

Dentro de los cauces fluviales existe diversidad de factores los cuales generan complejos procesos, además de transformar el sistema fluvial en una estructura sobre la cual es posible analizar componentes espaciales y evaluaciones temporales.

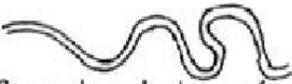
<u>GRADO DE SINUOSIDAD</u>	<u>GRADO DE ENTRELAZAMIENTO</u>	<u>GRADO DE ANASTOMOSAMIENTO</u>
 1 - 1.05	 <5%	 <5%
 1.06 - 1.25	 5 - 34%	 5 - 34%
 >1.26	 35 - 65%	 35 - 65%
 >65%	 >65%	
<u>CARACTER DE LA SINUOSIDAD</u>	<u>CARACTER DEL ENTRELAZAMIENTO</u>	<u>CARACTER DEL ANASTOMOSAMIENTO</u>
 Cauce de ancho homogéneo, profundo, de fase única.	 Predominan los bancos de arena y/o grava.	 Predominan cauces laterales sinuosos.
 Cauce de ancho homogéneo, de fase única.	 Bancos e islas.	 Predominan las curvas rectificadas.
 Cauce de fase única, más ancho en las curvas, rectific. raras.	 Predominan las islas de formas variadas.	 Cauce dividido, con ramificaciones sinuosas.
 Cauce de f. única, más ancho en las curvas, rectificaciones comunes.	 Predominan las islas, largas y estrechas.	 Cauce dividido, con ramificaciones subparalelas.
 Cauce de f. única, variaciones irregulares del ancho.		 Cauce compuesto.
 Sinuosidad doble, desfasada en estriaje.		
 Sinuosidad doble, bimodal en cauce lleno.		

Figura 2. Índices de Sinuosidad para ríos y morfología de los cauces (Boggs 1985).

Los cauces principales del río y sus brazos suelen tener agua, pero no necesariamente agua corriente, en todas las épocas del año. Cuando el río penetra en la llanura aluvial comienza a serpentear formando meandros cuyas curvas son proporcionales a la anchura del río, cuando se constituyen tales cauces trenzados, la llanura inundable lateral tiene a veces una anchura limitada y toda su extensión puede quedar contenida en el cauce principal (Leopold 1964).

Las llanuras inundables típicas se caracterizan por los siguientes elementos:

- a) Cauce del río.
- b) Meandros abandonados a lagos fluviales que son tramos de un cauce antiguo.
- c) Puntos de depósitos de acarreo en las tierras que forman la orilla convexa del río.
- d) Huellas de meandros, o depresiones y elevaciones en las tierras que quedan en la orilla convexa a medida que el cauce emigra lateralmente por la erosión de la orilla cóncava.
- e) Lodazales, o zonas de aguas estancadas formadas tanto en las depresiones de viejos meandros como a lo largo de los límites del valle cuando las riadas fluyen directamente valle abajo formando cauces en los límites del valle.
- f) Diques naturales: lomas o crestas que sobresalen de la superficie de la llanura inundable adyacente al cauce, formadas generalmente por materiales más toscos depositados cuando las crecidas sobrepasan las orillas del cauce.
- g) Playas de arena: depósitos de materiales sueltos, generalmente de partículas de grava y arena en forma de playas o restos desparramados.

Para Villota (1991) algunas de las geoformas aluviales son:

- ❖ La **llanura aluvial de piedemonte** es una unidad genética correspondiente a una planicie inclinada con topografías de glacis, que se extienden al pie de sistemas montañosos, serranías y escarpe de altiplanicies, y que ha sido formada por la sedimentación de las corrientes de agua que emergen de los terrenos más elevados hacia las zonas más bajas y abiertas.
- ❖ La **llanura aluvial de río trenzado** tiene unos márgenes fácilmente erosionables y susceptibles a los desplomes, se trata de corrientes intermitentes, cuyo caudal fluctúa con tal violencia que durante la máxima cresta de crecientes el enorme volumen de agua que inunda linealmente a toda o casi toda la llanura, la convierte temporalmente en un cauce enormemente ensanchado, complementan el escenario de río trenzado, uno o más niveles de terrazas las que pueden tener deposicional o erosional y los correspondientes escarpes y taludes de terraza.
- ❖ La **llanura aluvial meándrica** hace referencia a la llanura aluvial abierta localizada a considerable distancia de áreas de erosión como cordilleras, serranías, altiplanicies,

o bien a la llanura intermontana enmarcada por vertientes estables y escasamente erosionables. Los rasgos morfológicos que predominan son el *Plano Inundable* siendo susceptibles a inundaciones periódicas u ocasionales, en el que se destacan varias generaciones de orillares, meandros abandonados con agua o colmatados y algunas sobrevegas; las *Terrazas Deposicionales* localizados a ambos lados del plano inundable y originados por repetidos descensos del nivel de base de erosión.

- ❖ Por último, se encuentra la **llanura aluvial de desborde y Llanura fluvio- deltaica**, se tratan de llanuras construidas por los meándricos o meándricos trenzados, espacialmente se extienden como llanuras intercordilleranas, cuyas corrientes reciben de los relieves circundantes una elevada carga de sedimentos en suspensión y también de lecho.

2.2. Herramientas geomáticas

Las técnicas geomáticas son un conjunto de tecnologías geoespaciales, así como programas informáticos especializados para el análisis de los datos y su representación espacial. Entre las más importantes, se destacan la Teledetección, los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los sistemas de posicionamiento Global (GPS) y la cartografía, así como software para el procesamiento digital (Reyes, 2012).

La geomática se refiere a la medición, visualización, análisis, localización, y demás metodologías informáticas que anteriormente no habían sido incluidas en los estudios con exactitud (Tomado y adaptado Pérez 2002), debido a esto, el trabajo que se presenta a continuación utiliza algunas de estas tecnologías integrando el trabajo de campo y técnicas tradicionales utilizadas para la investigación.

La geomática crea una visión detallada y comprensible del mundo real debido a que integra disciplinas innovadoras como la percepción remota o teledetección, fotogrametría, cartografía, Sistema de Información Geográfica (SIG), geodesia, topografía, posicionamiento por satélite (Pinto, 2013).

Las herramientas que proporciona la geomática son de gran valor para la toma de decisiones asociadas al manejo de los recursos naturales, amenazas naturales y fenómenos espaciales, permitiendo cuantificar de forma inmediata, áreas, longitudes, tendencias y formas de algunas de las variables analizadas, por medio de operaciones de selección, cruce y combinación.

Los SIG han producido una revolución tecnológica, pero principalmente están generando una notable revolución intelectual, su base es una serie de capas de información espacial en formato digital que representan diversas variables (formato raster), o bien capas que representan objetos (formato vectorial) a los que corresponden varias entradas en una base de datos enlazada. Toda vez que sus planteamientos teóricos permiten pensar y actuar espacialmente. Producto de esa dinámica los SIG se han convertido en un lenguaje de la

geografía (localización, distribución, asociación, interacción y evolución), permeando todas las áreas del conocimiento humano (Gómez, 2010; Peña, 2006).

2.2.1. Fotografías aéreas

La interpretación de las fotografías aéreas, en general, consiste en examinar, definir y representar las formas que vienen impresas en el área de importancia para la investigación, además se define un significado determinado para cada una de las formas encontradas.

En esta investigación se definen geoformas en cada una de las fotos en diferentes lapsos de tiempo, como lo son: cauces, paleocanales, terrazas antiguas, meandros abandonados etc., para realizar una reconstrucción multitemporal, con la cual se logra definir patrones sobreimpuestos en la historia de las geoformas encontradas y su disposición geográfica ante amenazas naturales como los son: inundaciones, desbordes (avulsiones), cambios de dirección y huellas dejadas a su paso (tomado y adaptado Colwell 1952).

En sentido amplio, cuando dicha interpretación fotográfica se efectúa con fines geológicos, recibe el nombre de "fotogeología", que la Photogeology Section, del U. S. Geological Survey (1956; AGI, 1957; Ray, 1956), considera como "el estudio e interpretación de las fotografías, por lo regular aéreas, con objeto de obtener información geológica, lo que, normalmente, incluye también la presentación de tal información en forma apropiada, como mosaicos, mapas geológicos superficiales".

La técnica fotogeológica constituye, pues, una rama particular de la interpretación de las fotografías aéreas, en esta investigación tiene una aplicabilidad hacia la previsión de las inundaciones, además una búsqueda de variaciones morfodinámicas de los ríos Magdalena y Sumapaz a lo largo de la historia existente.

Para el área de estudio se utilizan fotografías aéreas que suministra el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), este tipo de fotografías aéreas cuentan con especificaciones del año en el que fue tomado el registro, número de vuelo, la escala y la altura (Tabla 1).

Tabla 1. Líneas de vuelo empleadas en el estudio.

VUELO	SOBRE	FOTOGRAFIAS	TOMA	ESCALA
C-252	S-1200	997	20/01/1942	1:35000
C-686	S-20424	32	18/01/1954	1:30000
C-192	S-1053	841	08/04/1941	1:15000
C-143	S-983	846-845	09/11/1942	1:33000
C-24	S.826	608-609	13/02/1940	1:33000

R-632	S-3177	229 (080)	01/05/1967	1:7700
R-632	S-3167	11	01/05/1967	1:8000
R-632	S-3168	017-018-019	01/05/1967	1:7900
R-801	S-5081	76-75	01/02/1981	1:28500
R-928	S-6368	009-008	01/09/1983	1:8200
R-928	S-6371	56-55	01/09/1983	1:8700
R-929	S-6393	162	01/08/1983	1:28600

Las fotografías aéreas se procesan para su utilización en un SIG. La metodología que se utiliza para hacer la georeferenciación de dichas fotografías es la siguiente:

- Escaneo de las fotografías a una resolución de 600 píxeles por pulgada, logrando equilibrar la definición óptima del registro con la información real que puede extraerse de una imagen.
- Para su almacenamiento digital se ha elegido el formato TIFF, ya que su estructura de compilación no emplea algoritmos de compresión que afecten la calidad de la imagen.
- Introducción de datos referentes a las características de las fotografías tales como calibre de la cámara, diámetro de las lentes o distancia focal, altura a la que se ha tomado la fotografía, sistema de proyección cartográfica que se desea, entre otros parámetros, todos proporcionados por la información que contiene cada fotografía-papel en sus márgenes laterales.
- Localización de puntos de control en cada una de las fotografías aéreas, de los cuales deben determinarse sus coordenadas (x, y, z) con el mayor rigor posible pues posteriormente serán utilizados como sitios de calibración para la corrección de la imagen y para su verificación.
- Elaboración del Modelo Digital de Elevación DEM a partir de las curvas de nivel con valor de altitud (z), con lo cual la imagen se ajustará a la orografía del territorio, eliminando así la distorsión que se produce en zonas de altimetría irregular.

El análisis realizado consiste en examinar todas las variaciones espaciales, geométricas, texturales, entre otras. El objetivo principal es reconocer los cambios en la arquitectura fluvial a través de diferentes épocas.

Las imágenes procesadas han permitido definir diferentes niveles de terrazas generadas por la dinámica de los ríos Magdalena y Sumapaz, que influyen directamente sobre las zonas de interés del presente estudio.

De igual manera de acuerdo con patrones de tono, textura y geometría se han definido temporalidad para las diferentes terrazas identificadas, obteniendo de esta manera zonas de

influencia actual por problemas de inundación, terrazas subrecientes y terrazas antiguas, así como paleocanales antiguos y cicatrices que muestran pasajes del río en épocas de antaño.

Posterior al análisis de fotografías aéreas, se realiza la recopilación de información obtenida y se elaboran mapas de dinámica fluvial a través del tiempo, teniendo en cuenta los rasgos morfológicos presentes en cada fotografía analizada y la interpretación geológica de cada caso.

2.2.2. Representación de tridimensional del terreno

Un modelo de superficie es una representación digital de entidades, ya sea real o hipotética, en un espacio tridimensional. Una superficie 3D suele derivarse o calcularse, mediante algoritmos especialmente diseñados para ello que toman datos de puntos, de líneas o de polígonos como muestra y los convierten en una superficie 3D digital. El software ArcGIS puede crear y almacenar cuatro tipos de modelos de superficie: ráster, de red irregular de triángulos (TIN), los datasets (conjunto de datos o archivos tabulados asociados a la superficie) de terreno, y datasets LAS.

Estos modelos de superficie se pueden crear a partir de una amplia variedad de fuentes de datos. Los dos métodos principales a la hora de crear modelos de superficie son la interpolación y la triangulación. Existen diversos métodos de interpolación para crear superficies de ráster, como *Distancia inversa ponderada*, *Spline*, *Kriging* y *Vecino natural*. Puede formar superficies trianguladas mediante la creación de una superficie TIN, dataset de terreno o dataset LAS, también puede convertir entre estos modelos de superficie.

Todas las superficies ráster, TIN, de terreno y datasets LAS son todos los tipos de superficie funcional. Una superficie funcional es un campo continuo de valores que puede variar en un número infinito de puntos. Por ejemplo, los puntos de un área de la superficie terrestre pueden variar en elevación. Cualquiera de estos valores se puede representar en el eje z de un sistema de coordenadas x, y, z tridimensional, por lo que suelen conocerse como valores z.

Los modelos de superficie le permiten almacenar la información del área en un SIG. Dado que ésta contiene un número infinito de puntos, es imposible medir y registrar el valor z en cada punto. Un modelo de superficie se aproxima a una extensión tomando una muestra de los valores en diversos puntos interpolando los entre estos.

2.2.2.1. Adquisición de información topográfica

Para la adquisición de la información topográfica fue necesario realizar una campaña de campo durante 7 días donde se realizó la toma de datos mediante un equipo “**Estación Total Topográfica Topcon GTS 236W**” y un par de bastones topográficos, con ellos se midió el nivel del río Magdalena a cada costado, las diferentes terrazas circundantes de los ríos. con estos datos se generó un modelo topográfico que permite diferenciar zonas dependiendo de sus diferentes alturas.



Fotografía 1. Estación Total Topográfica Topcon GTS 236W y Tipo de Prismas utilizados en levantamiento topográfico.

El estudio topográfico se enfocó en la toma de datos relacionados con la infraestructura existente, diferentes niveles de terrazas asociadas a los ríos, accidentes topográficos más importantes y zonas de interés para este trabajo.



Fotografía 2. Levantamiento topográfico con estación. Arriba: Sector Barrio Villa Carolina.

Para la evaluación topográfica se tomaron datos de 1352 puntos con sus respectivas coordenadas geográficas, altura e información general para generar modelos topográficos detallados que permitan analizar cuáles son los niveles de inundación que pueden alcanzar los ríos de esta zona. El Río Magdalena fue el más estudiado ya que es el principal causante

de procesos de inundación en la zona debido a sus condiciones hidrodinámicas y topográficas; el modelo digital generado a partir de todos estos datos permite identificar el nivel base promedio del río, las diferentes terrazas y zonas inundables.

2.2.2.2. Modelo TIN con sombras

Los modelos son una herramienta indispensable para el análisis geomorfológico ya que debido a su buena escala de detalle permite apreciar con mayor claridad las estructuras geomorfológicas presentes en la zona de estudio. Lo cual para el estudio de esta área es muy importante, permitiendo delimitar con mayor exactitud las estructuras generadas por el modelamiento fluvial de ríos Magdalena, Sumapaz. Donde se identificaron las terrazas de acumulación, subcrecientes, antiguas, paleocanales, zonas donde aflora la roca y llanuras de inundación actuales de los ríos.

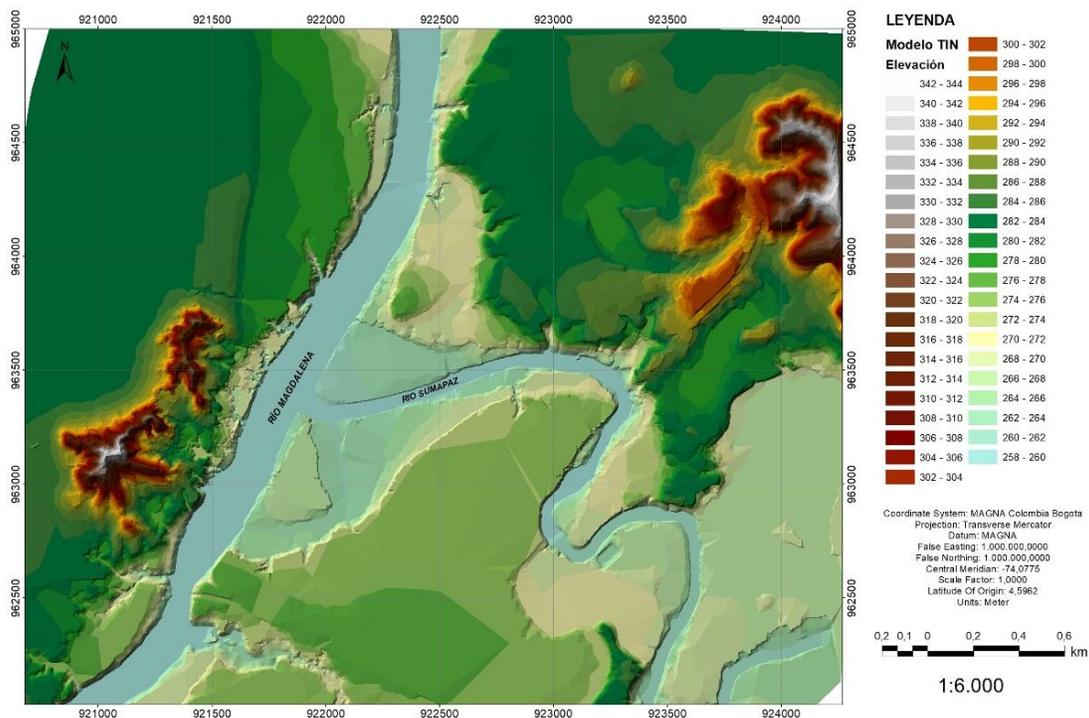


Figura 3. Modelo digital de elevación para la zona de estudio total. (Fuente propia).

2.2.2.3. Modelo de Sombras

Un archivo Hillshade, también conocido como mapas de sombras, es un modelo digital cuya función es la representación de sombras y niveles de radiación solar sobre el terreno generados a partir de los Modelos Digitales de Elevación.

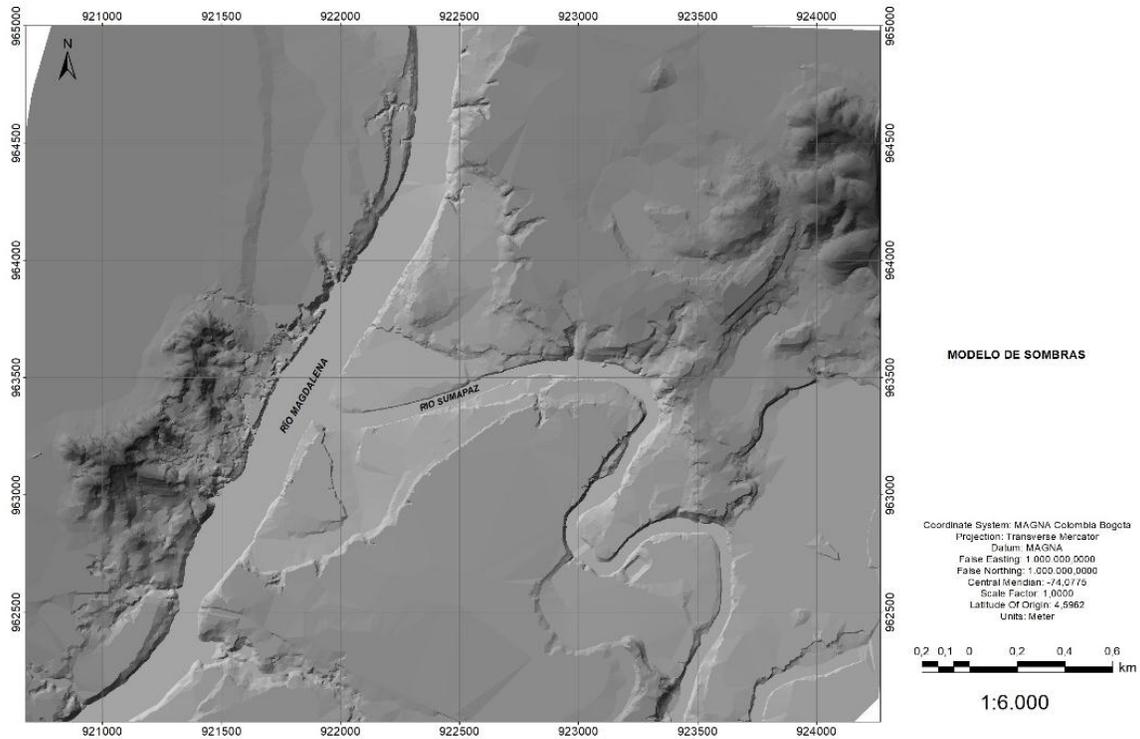


Figura 4. Modelo de sombras. Fuente propia.

2.2.2.4. Pendiente

La pendiente es una forma de medir el grado de inclinación del terreno, es una variable cuantitativa y continua, la cual es directamente proporcional a la inclinación. Las pendientes calculadas para el área de estudio permiten definir con gran propiedad zonas de escarpe y límites de terraza que han sido generadas por procesos fluviales principalmente.

Los rangos de pendientes generados están basados en los propuestos en la guía metodológica para la generación de mapas geomorfológicos analíticos del Servicio Geológico Colombiano (2012), empleados para la delimitación de unidades geomorfológicas (ver Figura 5).

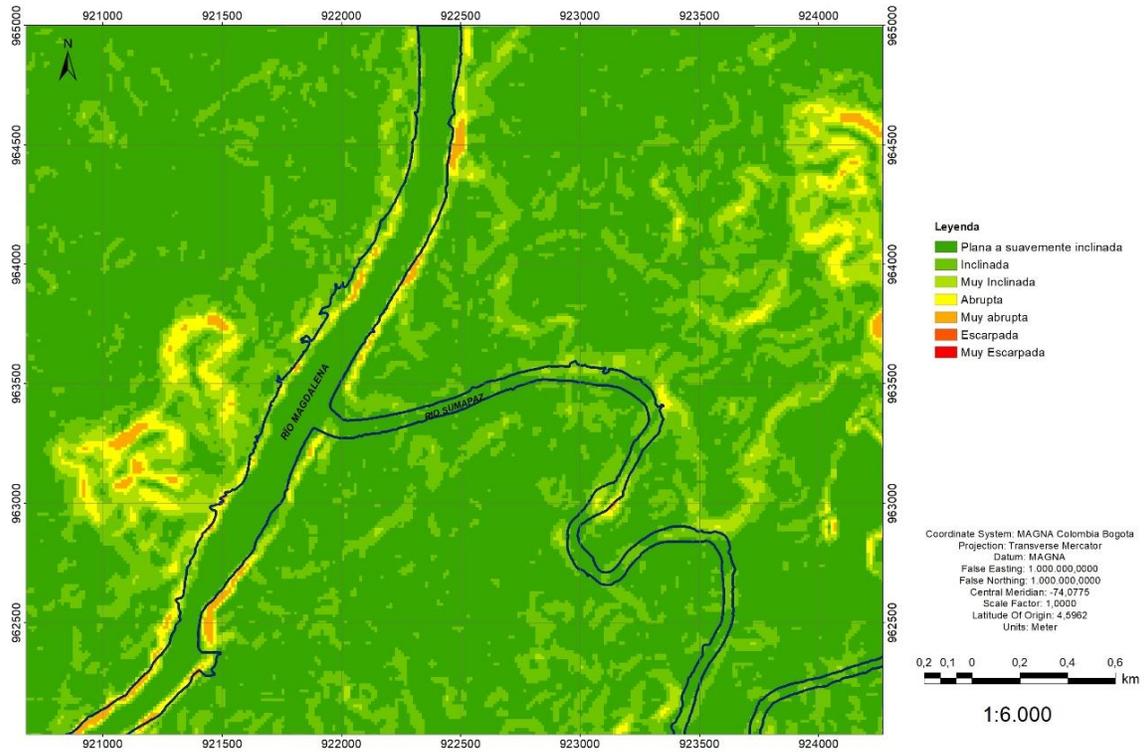


Figura 5. Zonificación de Pendientes del Área de estudio. Fuente propia.

2.3. Control de Campo

El reconocimiento de campo fue llevado a cabo durante las tres últimas semanas del mes de enero de 2016.

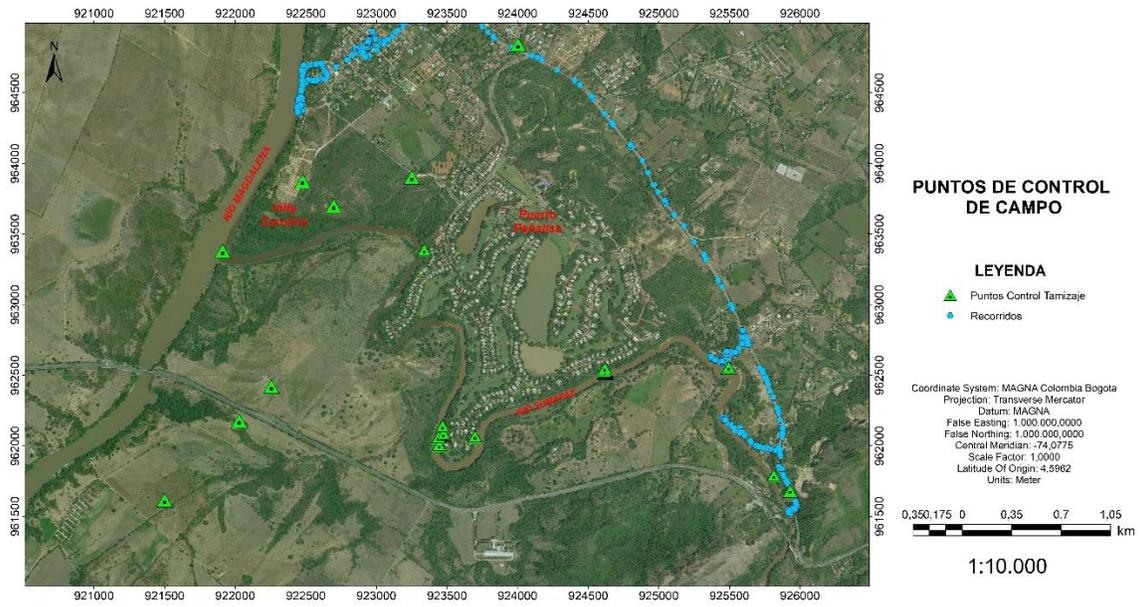


Figura 6. Puntos de control de campo sobre las áreas de interés. Ortoimagen IGAC 2015 de la zona de estudio. Se indican los recorridos del área de estudio con los puntos verdes y puntos de la toma de muestras para tamizaje con los triángulos.

3. GEOLOGÍA

3.1. Geología Regional

La geología regional de la zona de estudio, está definida por la Plancha 245 Girardot escala 1:100.000, con un área de 2.400 Km² aproximadamente, extendiéndose desde la región suroccidental del departamento de Cundinamarca y la zona noreste del departamento del Tolima, en un área geográfica que va desde el flanco oriental de la Cordillera Central, el flanco occidental de la Cordillera Oriental, hasta la transición entre el Valle Superior y el Valle Medio del Río Magdalena (Acosta et al., 2002).

En esta área, se destacan los Depósitos de Abanicos que surgen desde la Cordillera Central y abarcan alrededor del 25% de la plancha y para el caso de las rocas, se han identificado afloramientos con edades que van desde precámbrico, hasta periodos recientes; se destacan las formaciones Payandé y Saldaña, que representan los sistemas Triásico y Jurásico, y el Batolito de Ibagué, que es uno de los mayores cuerpos intrusivos que se destacan en el flanco oriental de la cordillera central; las formaciones Caballos, Hondita, Loma Gorda, Conejo, la formación la Tabla, así como el grupo Olini y el nivel de lutitas y arenas, constituyen el sistema cretácico y se establece que hacia el oriente y el occidente de la plancha, estas unidades difieren en algunas características (Acosta et al, 2002).

Las formaciones Seca, Hoyón, los grupos Gualanday y Honda, así como las formaciones San Juan de Rio Seco, Santa Teresa, Barzalosa y Carmen de Apicalá, conforman el cenozoico, y hacia el suroriente, norte y suroccidente de la plancha, es decir las cuencas del Valle superior, Valle Medio del Magdalena y las estribaciones de la cordillera oriental, se observan rasgos litológicos diferentes en cada una de las sucesiones que afloran en los espacios mencionados; para el caso del cuaternario, este se compone de coluviones y depósitos aluviales, tanto de los ríos Magdalena, Bogotá y Coello, como de los abanicos de Ibagué y Espinal (Acosta, et al, 2002).

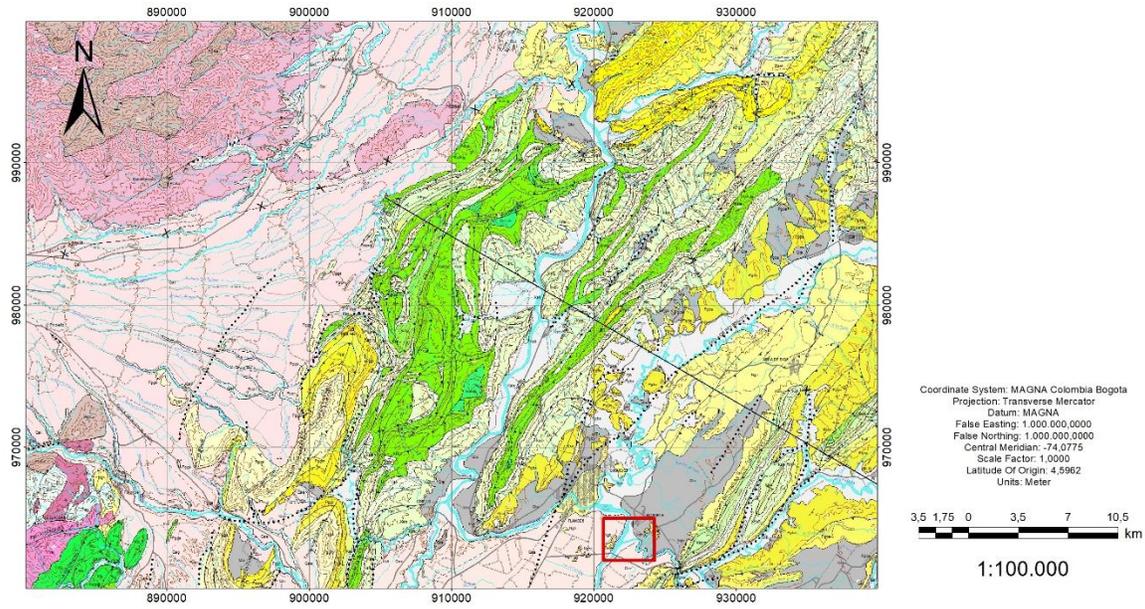


Figura 7. Plancha 245 - Girardot, escala 1:100.000, donde se muestra el área de estudio (recuadro en negro). Tomado de Acosta et al. (1999).

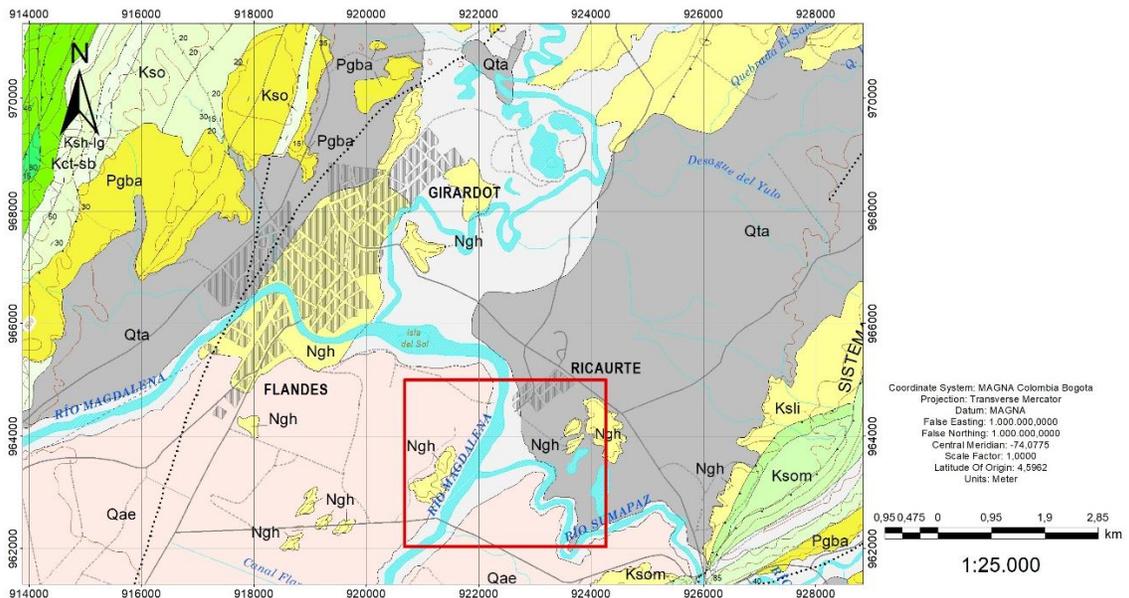


Figura 8. Fragmento de la Plancha 245 – Girardot de Acosta et al. (1999), donde se muestra el área de estudio (recuadro en negro). Destacan principalmente las unidades cuaternarias correspondientes al abanico de Espinal y depósitos aluviales además del Grupo Honda.

3.2. Geología Específica

En la zona de estudio afloran rocas sedimentarias que abarcan un rango temporal desde el Cretácico hasta el reciente. Las rocas sedimentarias del Cretácico al Paleoceno encontradas en el sector oriental de Ricaurte difieren de las unidades encontradas al occidente, esto se debe a que la geología estructural incidió en los materiales que se depositaron en los diferentes sectores del área de trabajo. Para la descripción de las unidades geológicas cartografiadas se utilizan los nombres de los sectores geográficos donde se encuentran aflorando y en la mayoría de los casos se usan los nombres informales arraigados en la literatura geológica.

La geología de la zona de estudio, se caracteriza por estar compuesta de terrazas aluviales antiguas y actuales, que se generaron a partir de los procesos fluviales de los ríos Magdalena y Sumapaz principalmente, donde entre los 60.000 y 23.000 años A. P. los glaciales alcanzaron su máxima extensión sobre la Sabana de Bogotá, y en los sucesivos periodos interglaciales se dio un aumento significativo de las aguas y sedimentos transportados por los cauces aledaños, como el río Sumapaz y Bogotá, por los que estos presentaron un régimen de transporte, erosión y acumulación diferente al actual.

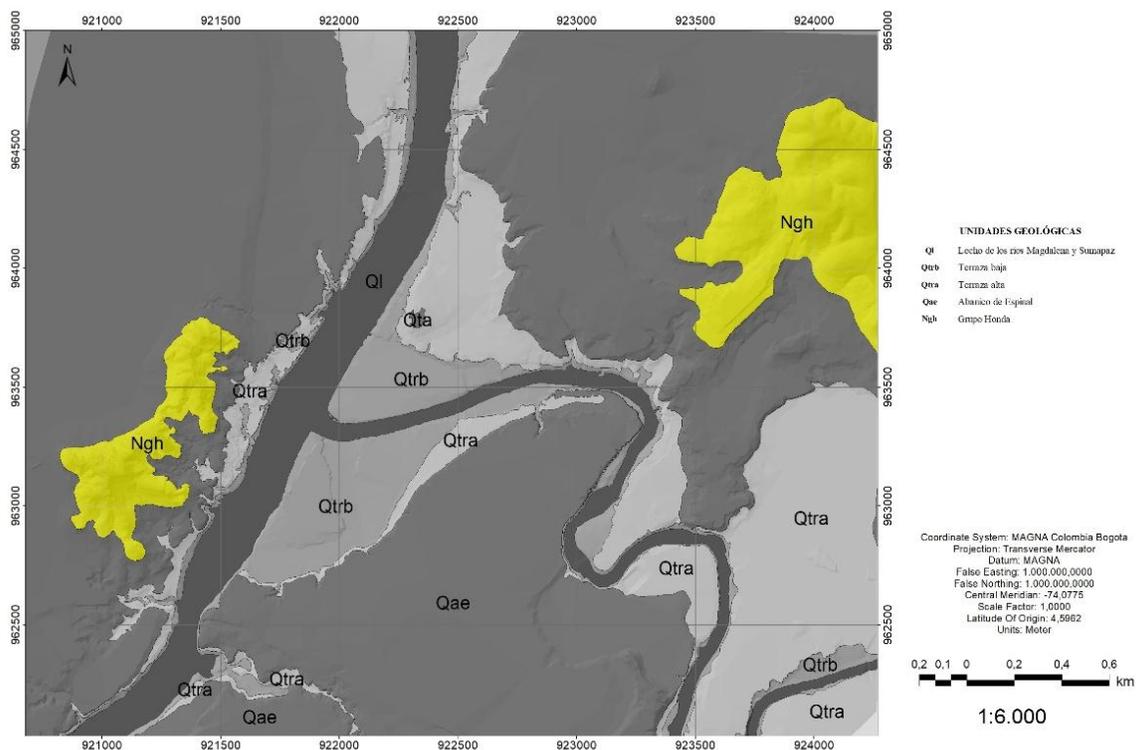


Figura 9. Unidades geológicas presentes en la zona de estudio. Fuente: propia.

3.3. Unidades Estratigráficas

A continuación, se mencionan las unidades presentes dentro del área de estudio.

3.3.1. Grupo Olini (Kso)

Nombre introducido por Petters (1954a), al mencionar la unidad que contiene los foraminíferos descritos por él, sin dar más información de la unidad. De Porta (1965) establece que en la región geológica situada entre Honda y Guataquí, se evidencia que, entre el conjunto de niveles silíceos y los sedimentos existentes entre ellos, se forma una unidad litoestratigráfica, que tiene una correlación directa con las unidades definidas como Grupo Olini por Petters en 1954, aunque se reconoce que, en la publicación, no se llegó a definir completamente este grupo (Acosta et al., 2002).

Al oriente del río Magdalena, las características de esta unidad se resumen así: la parte inferior está constituida por liditas y limolitas silíceas, algunas levemente calcáreas, en capas delgadas a medias, onduladas a lenticulares, correspondientes a la Formación Lidita Inferior. Esta secuencia está suprayacida por arenitas finas de cuarzo, blancas, con cemento silíceo, en capas delgadas a gruesas, plano paralelas y convergentes; hacia la parte inferior del segmento ocurren esporádicas capas de lodolitas laminadas, denominadas Formación El Cobre. Continúa una secuencia alternante de lodolitas negras, con intercalaciones de arenitas finas de cuarzo, blancas, con cemento silíceo, en capas medias y delgadas, plano paralelas, liditas y limolitas de cuarzo en capas delgadas, plano paralelas, con foraminíferos, correspondiente a la Formación Lidita Superior.



Fotografía 3. Capas delgadas (3 a 10 cm) de liditas pertenecientes al Grupo Olini sector de San Martín, debajo del puente. Fuente propia.

3.3.2. Formación La Tabla (Kslt)

Nombre y rango asignados por De Porta (1966) para designar el conjunto netamente detrítico que suprayace al Nivel de Lutitas y Arenas. Su nombre procede del cerro La Tabla, en el Departamento del Tolima, y como sección tipo, el autor propone la sucesión litológica que aflora por el camino entre Piedras y el cerro La Tabla. La unidad ocurre a lo largo de la región de estudio y forma franjas alargadas, escarpadas que se destacan en el relieve. La litología predominante son limolitas y lodolitas calcáreas con algunas capas intercaladas de areniscas. Con base en fauna colectada se ha determinado una edad de Maastrichtiano (De Porta, 1965).



Fotografía 4. Rocas estratificadas en capas delgadas (3 a 10 cm) a gruesas (30 a 100 cm) de areniscas compactas pertenecientes a la Formación La Tabla, Sector Callejones. (Fuente propia).

3.3.3. Formación Barzalosa (Pgba)

Nombre establecido por Scheibe (1934a), para describir, con el rango de piso una secuencia de lodolitas rojas, con intercalaciones de arenitas y conglomerados, que afloran en las cercanías al caserío de Barzalosa al noroccidente de Girardot.

El contacto inferior de la unidad es discordante y se coloca en la base de una capa de conglomerados, que suprayace a lodolitas y arenitas calcáreas del Nivel de Lutitas y Arenas, de las liditas del Grupo Olini o de las arcillolitas de la Formación Seca. Su contacto superior con la Formación Honda, no se observó, por encontrarse bajo sedimentos de edad Cuaternario o por estar afectado por falla, mientras que al suroriente la relación es fallada con los Conglomerados de Carmen de Apicalá (Acosta et al., 2002).



Fotografía 5. Areniscas masivas, friables, color crema asociadas a la Formación Barzalosa, sector el Ciruelo. Fuente propia.

3.3.4. Grupo Honda (Ngh)

Nombre introducido por Hettner (1892) derivado de la población de Honda, en el departamento del Tolima, para designar una arenita típica, gris verdosa. Se identifican 2 niveles, el inferior consta de capas gruesas de arenitas conglomeráticas, verdes amarillas, feldespáticas y líticas. El nivel superior se encuentra representado por una sucesión alternante más marcada de arenitas cuarzofeldespáticas, intercaladas con capas gruesas de arcillolitas fisibles abigarradas. La edad asignada es de Oligoceno tardío según fauna encontrada, Stirton (1953). Este Grupo cubre discordantemente las rocas de edad cretácica y es cubierta discordantemente con los depósitos aluviales del Cuaternario.



Fotografía 6. Areniscas masivas, color crema a gris verdoso, asociadas con el Grupo Honda, sector condominio San Marcos. Fuente propia.



Fotografía 7. Areniscas masivas, color crema, asociadas con el Grupo Honda, sector condominio Puerto Peñalisa, Río Sumapaz. Fuente propia.

3.3.5. Terrazas altas (Qta)

A lo largo de la plancha 245 Girardot, se destacan una serie de terrazas antiguas y recientes, en las principales márgenes de los ríos Sumapaz y Magdalena, que se caracterizan por ser de extensión limitada, con algunas medias entre 10 y 15 m con relación al nivel de aguas normales de tales cauces, de modo, que apenas se pueden cartografiar (Acosta et al, 2002). Las terrazas altas de la zona, en su gran mayoría reposan en rocas del grupo Honda, para formar mesetas pequeñas en las partes altas de tales rocas, que a su vez ayudan a proteger de la erosión a los afloramientos subyacentes a las terrazas (Acosta et al, 2002).

En relación a la descripción litológica, generalmente se caracterizan por ser depósitos de carácter no consolidado, que están constituidos por gravas y cantos de diferentes tamaños, desde heterométricos, subangulares, hasta redondeados, que descansan sobre una matriz de arena y arcilla con baja compactación; para el caso específico de las márgenes del río Magdalena, las terrazas altas se componen principalmente de arenitas y limolitas silíceas, en una matriz arcillosa de color rojo, con un nivel de espesor que varía y puede alcanzar hasta los 10 cm (Acosta, et al, 2002).

3.3.6. Abanico el Espinal (Qae)

Esta formación se compone de un depósito de flujo de lodos, proveniente desde el valle del río Magdalena por la localidad de Gualanday, y que hace parte de los flujos que lograron superar la barrera natural del mismo nombre (Duque & Escobar, 2006). En relación con los flujos de lodo, término importante para entender la formación abanico el Espinal, Insuasty (2012) establece que estos se originan, cuando se combinan agua, y sedimentos provenientes ya sea, de depósitos de materiales piroclásticos, o de deslizamientos de tierra, en donde generalmente predominan, además de los sedimentos de suelo, partículas finas de limo y arcilla en grandes concentraciones, sin que se descarten bloques o cantos más grandes de rocas.

El abanico Espinal vio impedida su extensión hacia el oriente por la barrera que constituyeron los estratos de la formación Gualanday, aunque en algunos sitios se pueden ver pequeñas capas suprayacentes del mismo material del abanico de Ibagué que superaron la barrera (Duque & Escobar, 2006).

3.3.7. Cuaternario aluvial (Qal)

El cuaternario aluvial o depósitos aluviales, se caracterizan por tener niveles de poco espesor y extensión, pero principalmente por estar ubicados en las llanuras de inundación de los principales ríos, se incluyen además extensas áreas de sedimentos activos, barras y playa, formadas principalmente por limos, arenas y gravas de diferente composición (Acosta, et al, 2002). Los depósitos aluviales forman vegas y valles de corta extensión, que a su vez son aprovechados tanto para cultivos como para pastos de ganadería y en general, sobresalen los depósitos aluviales a lo largo del río Magdalena, debido a que en épocas de creciente se aumenta la acumulación de material en ambos márgenes del río, que a su vez se incrementa cuando se represan sus tributarios por diferencias de caudal (Acosta, et al, 2002).



Fotografía 8. Identificación de sedimentos asociados con llanuras de inundación, sector Barrio Villa Carolina. (Fuente propia).

4. SEDIMENTOLOGÍA

El estudio sedimentológico tiene el objeto de compilar información para conocer con más detalle el comportamiento del río, de tal manera que se tenga información adicional para la mitigación de amenazas, para los controles de dragados, y demás obras fluviales requeridas para el desarrollo de la región.

4.1. Procesos Fluviales

Los ambientes fluviales pueden ser estudiados desde dos perspectivas: geomorfología que analiza las formas del relieve, patrones de drenaje, cambios en la dinámica del río, entre otros y sedimentología que estudia las características específicas del medio, depósitos resultantes y facies sedimentarias. Para su estudio se analizan características y dinámicas específicas del medio y con base en ellas y en los depósitos recientes observados, se pueden construir modelos y secuencias que pueden ser comparadas con depósitos y rocas más antiguas (Boggs, 1987).

Un ambiente fluvial está caracterizado por procesos de erosión y sedimentación en el medio; llevando consigo cambios morfológicos significativos a través del tiempo. Los sistemas aluviales pueden ser divididos en ríos o canales, llanuras de inundación y abanicos aluviales.

Los depósitos fluviales están constituidos por sedimentos que se acumulan a partir de la actividad de los ríos y los procesos de deslizamiento por gravedad asociados. Aunque estos depósitos se están generando actualmente bajo una diversidad de condiciones climáticas, desde desérticas hasta glaciales, se reconocen cuatro sistemas fluviales bien definidos: (1) sistema de abanicos aluviales, (2) sistema de ríos trenzados, (3) sistema de ríos meándricos y (4) sistema de ríos anastomosados (Figura 10).

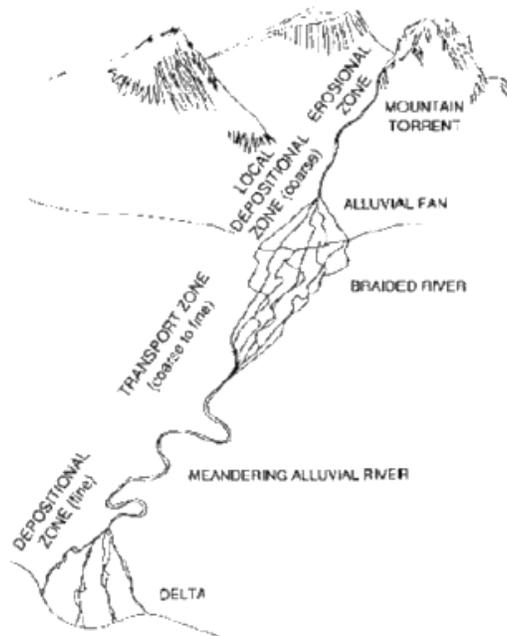


Figura 10. Perfil de sistemas fluviales. Tomado de Shumm (1981).

4.1.1. Sistemas trenzados

Este sistema fluvial es caracterizado por muchos canales separados por barras y pequeñas islas, y es muy común encontrarlos donde los sedimentos son abundantes, las descargas de agua son altas y esporádicas, y los ríos son sobrecargados con sedimentos; esto ocurre generalmente en las partes distantes de los abanicos aluviales. Durante los períodos de descarga alta, la corriente en los canales es rápidamente recargada de sedimentos gruesos, formando barras alrededor de las cuales la corriente se desvía; un desarrollo repetitivo de estas barras y la separación consecuente de los canales genera el aspecto trenzado de este sistema fluvial (Boggs, 1987).

Los sistemas de ríos trenzados son definidos a partir de los diferentes tipos de barras que en ellos se generan y que pueden ser agrupadas en tres tipos básicos:

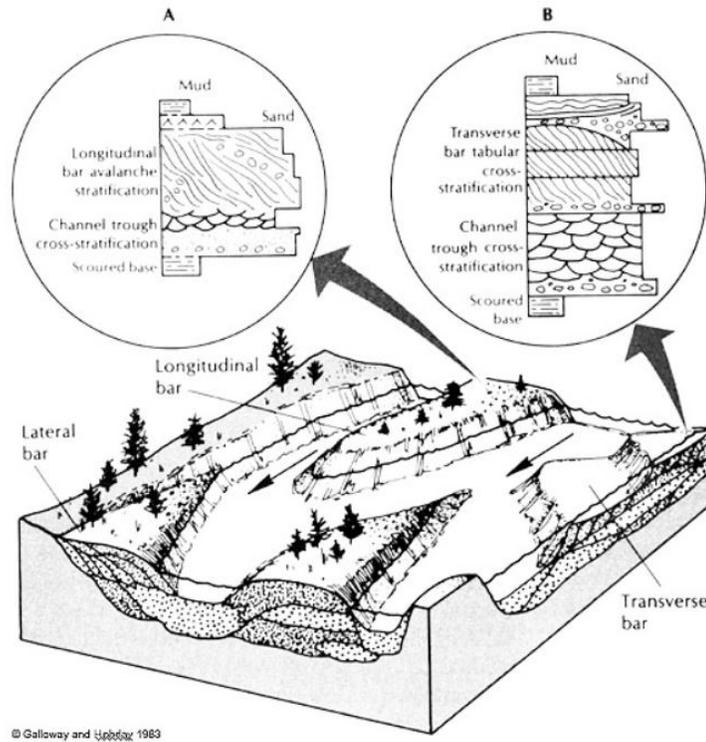


Figura 11. Tipos de barras en ríos trezados. Tomado de Galloway & Hobday (1983)

Barras Longitudinales

Son las barras que se forman en la parte media de los canales cuando los sedimentos más gruesos incluidos en la corriente (gravas y arenas), son depositados debido a la pérdida de competencia en el transporte, orientándose con el eje principal paralelo a la dirección de la corriente. La fracción gruesa del material se concentra a lo largo del eje principal y en la parte basal de la barra, tendiendo a existir una disminución en el tamaño del grano hacia arriba de la misma, y corriente abajo. La estructura interna de las barras longitudinales está representada por una estratificación principalmente masiva, aunque pueden presentarse capas con una estratificación horizontal pobremente desarrollada.

Barras Transversales

Estas se forman de manera transversal al flujo principal de la corriente, y son muy características en sistemas de ríos trezados que transportan una mayor carga de detritos del tamaño de la arena. Las barras transversales presentan formas rómbicas, llegando a representar rizaduras de gran escala por la inclinación característica de las capas.

Barras Laterales

Son barras muy largas que se desarrollan en áreas de energía relativamente baja a lo largo de las porciones laterales de la corriente principal.

Dentro de la zona de estudio se destaca la ocurrencia a través del tiempo de barras longitudinales y laterales en el río Magdalena que han sido erosionadas y depositadas de manera recurrente.

4.1.2. Sistemas meándricos

A diferencia del desarrollo de varios canales en los sistemas de ríos trezados, los sistemas de ríos meándricos tienden a ser confinados a un canal principal que presenta una sinuosidad mayor (Figura 12). En estos sistemas el gradiente de la pendiente es mucho menor, y los sedimentos involucrados en la carga de las corrientes son más finos. Otras de las características de los sistemas de ríos meándricos es que, por un lado, aunque algunos ocurren como sistemas independientes, otros pueden representar un cambio gradual (corriente abajo) de un sistema de ríos trezados; y por otro, comúnmente los grandes sistemas de ríos meándricos desarrollan en su desembocadura sistemas deltáicos de depósito (Boggs, 1987). Algunos autores prefieren llamar sistema de ríos de alta sinuosidad a este tipo de sistema fluvial (Miall, 1987).

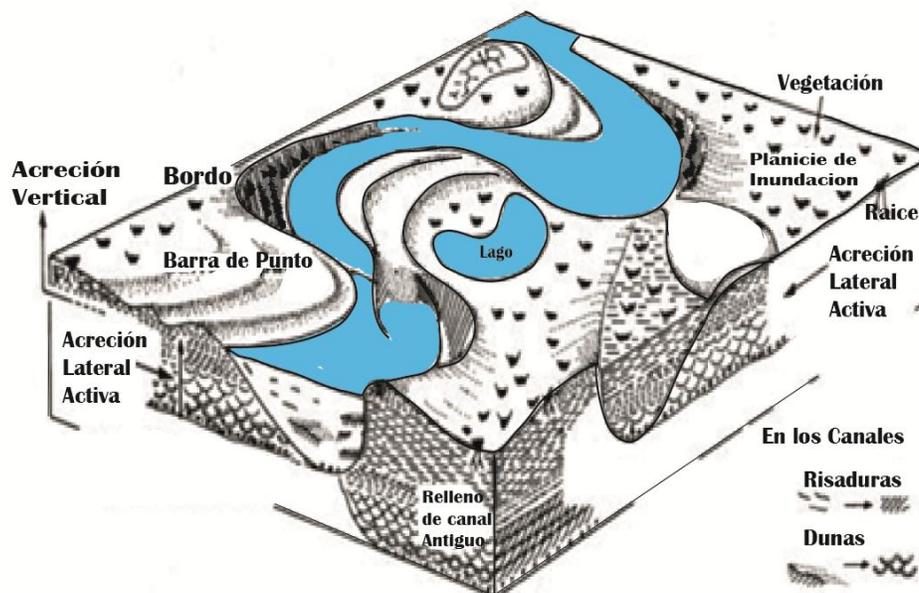


Figura 12. Esquema de un sistema meándrico. Tomado y adaptado Boggs (1987).

Los principales elementos morfológicos de que consiste un sistema de ríos meándricos (Figura 12) de acuerdo con Boggs (1987) son: (1) el canal principal, (2) las barras de punta, (3) los bordos naturales, (4) las planicies de inundación, (5) los lagos laterales, y (6) las áreas

de desborde. Ya que en estos sistemas los sedimentos se acumulan debido a la acción del canal principal y de la inundación periódica de la planicie adyacente, los depósitos están asociados a estos elementos morfológicos:

Depósitos de canal

Son depósitos compuestos generalmente de material grueso que los ríos pueden mover o transportar durante los períodos de máxima competencia de las corrientes. Este material incluye gravas, troncos u otro material vegetal de grandes dimensiones, y lodo parcialmente consolidado que ha sido erosionado de las paredes del canal. Tienden a ser depósitos de forma lenticular, en donde lo más característico es la imbricación de clastos que presentan.

Depósitos de Barras de Punta

Estos depósitos se generan en las partes interiores de las curvas del canal a partir de un flujo en espiral que se crea en dicho punto. Debido a este flujo, los granos más gruesos tienden a ser depositados en las partes basales de la barra, y los sedimentos finos en la parte superior, dando como resultado una secuencia de disminución de tamaño de grano hacia arriba de barra de punta. La estructura sedimentaria primaria más característica de los depósitos de barras de punta es la estratificación cruzada cóncava, tanto de pequeña como de gran escala.

Depósitos de Bordo

Estos depósitos se desarrollan en la porción cóncava de la curva que delimitan los meandros. Son de mayor espesor y de grano más grueso cerca de los canales y se hacen más finos a medida que avanzamos hacia la planicie de inundación. Arenas finas con estratificación horizontal y rizaduras de corriente, cubiertas por lodos laminados, son muy comunes en los depósitos de bordo.

Depósitos de Planicies de Inundación

Están constituidos por sedimentos finos depositados por suspensión a partir de las aguas que inundan la planicie adyacente al canal. Estos depósitos tienden a desarrollar poco espesor, y comúnmente contienen grandes cantidades de material vegetal; así mismo, presentan una bioturbación moderada.

Depósitos de desborde

Estos depósitos se generan cuando las aguas de la corriente principal logran romper los muros que la confinan. La sedimentación por tracción y suspensión ocurre rápidamente cuando el

agua cargada, tanto con material grueso como fino, pierde su competencia en el transporte, dando como resultado depósitos gradados.

Depósitos de lago lateral

Consisten en sedimentos finos, arcillas y lodo, que han sido introducidos a los lagos laterales durante las épocas de inundaciones. Son comúnmente laminados, y pueden llegar a presentar restos de plantas, así como ostrácodos y moluscos de agua dulce.

Los sistemas meandriformes se presentan en la desembocadura del río Sumapaz un par de kilómetros antes de su desembocadura debido al control litológico por rocas más resistentes del Grupo Honda al final de este cauce, que crean el encajonamiento del río al momento de desembocar en el río Magdalena.

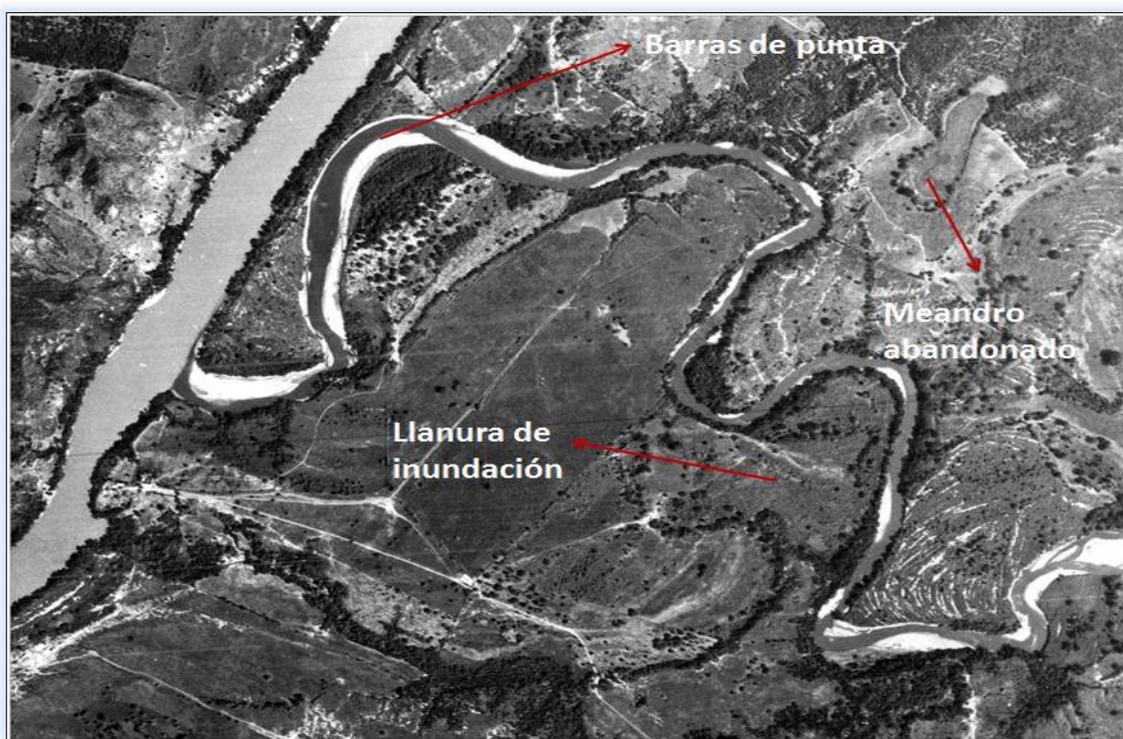


Figura 13. Sistema meándrico en la fase madura del río Sumapaz. Fotografía C-686,1954.

4.1.3. Sistemas anastomosados

A diferencia de los otros sistemas fluviales, los sistemas de ríos anastomosados han sido muy poco estudiados por los sedimentólogos. De hecho, este sistema ha sido considerado como un tipo especial de los sistemas de ríos meándricos, en donde se desarrolla un sistema de canales de muy alta sinuosidad de manera estable y permanente (Miall, 1977). Entre los trabajos más importantes que se han llevado a cabo sobre los sistemas de ríos anastomosados, es posible mencionar a Schumm (1968), Smith y Smith (1980), Rust y Legun (1983), Smith (1983).

Procesos de depósito

Para Smith y Smith (1980), el término anastomosado es empleado para describir un complejo de depósito fluvial de gradiente muy bajo ($0.09 - 0.012 \text{ m/km}$), en donde se interconectan una serie de canales de muy alta sinuosidad, angostos y relativamente profundos. Además, en estos sistemas los canales son separados por planicies de inundación que consisten en islas con vegetación, muros naturales y áreas donde pueden desarrollarse depósitos de desborde. Los canales en estos sistemas son rellenos con arena y grava, formando depósitos lenticulares, limitados por depósitos areno-arcillosos de muro natural. Por otra parte, en las planicies de inundación, los depósitos característicos los constituyen materiales limo-arcillosos finamente laminados, incluyendo depósitos finos de pantanos con un alto contenido de materia orgánica.

4.1.4. Sistemas de abanicos aluviales

Los abanicos aluviales son depósitos de detritos clásticos, que vistos en planta presentan formas característicamente cónicas. Este tipo de sistemas se desarrollan en las zonas aledañas a las porciones que delimitan los escarpes de altos morfológicos (Figura 14), en donde el aporte de sedimentos es mucho mayor y las corrientes son confinadas a valles angostos que se tienen dentro de una cuenca adyacente (Nilsen, 1982; Einsele, 1992). Son particularmente comunes en regiones áridas o semiáridas en donde la vegetación es escasa y el transporte de sedimentos ocurre esporádicamente, pero con gran violencia durante las tormentas. También llegan a desarrollarse en regiones húmedas, incluyendo en zonas de glaciales, en donde los procesos de canalización son más importantes.

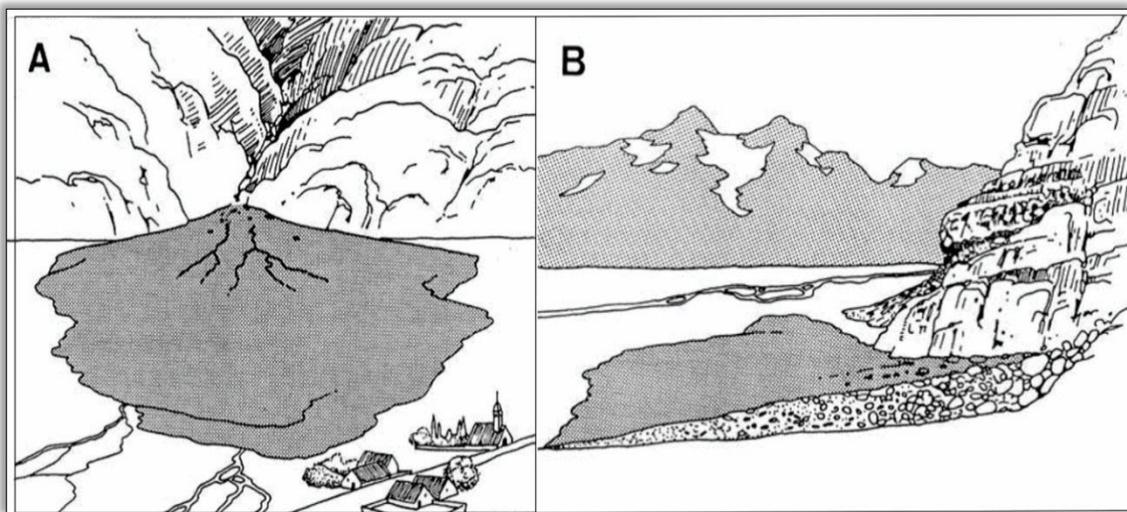


Figura 14. Representación esquemática de un abanico aluvial desarrollado en un valle suizo. Aspecto general (A) donde se aprecia la diversificación del canal principal. Sección radial

(B) en la que se manifiesta la distribución general de la granulometría de los clastos (font i Saguè, 1905).

Los procesos de transporte dominantes en el depósito de sedimentos dentro de estos sistemas fluviales según Boggs (1987) son:

Flujo de corrientes

La sedimentación en los abanicos aluviales da inicio cuando las corrientes pierden parte de su competencia para transportar material al salir de los valles confinados de las tierras altas. Los flujos de corrientes producen tres tipos de depósitos: (a) aquellos sedimentos depositados dentro de los canales de corrientes que se desarrollan dentro de los abanicos, llamados depósitos de canal. Estos sedimentos forman cuerpos angostos y alargados, consistiendo principalmente del material más grueso y pobremente clasificado que se deposita bajo este tipo de flujo. (b) Los depósitos de avenida son formados por el surgimiento de aguas cargadas de sedimentos que salen de los canales principales a la superficie del abanico. La sedimentación se da cuando las corrientes se ensanchan y se dividen en capas en donde la profundidad del agua y la velocidad de flujo decrecen (Bull, 1972). Estos depósitos son lateralmente continuos y están constituidos por gravas, arenas y limos. (c) Los depósitos de tamiz, ocurren en las porciones del abanico aluvial donde el aporte de arena, limo y arcilla es relativamente bajo, por lo que están caracterizados por lóbulos de grava gruesa.

Flujo de detritos

Este proceso de transporte es más común en zonas áridas y semiáridas donde se tienen lluvias poco frecuentes pero violentas, taludes con inclinaciones muy fuertes y vegetación escasa. Los depósitos de flujo de detritos son característicamente mal clasificados, incluyendo grandes bloques de diferentes tamaños, y no presentan estructuras sedimentarias primarias. Así mismo, son impermeables y no-porosos debido al alto contenido de lodo en la matriz.

Flujo de lodo

Los depósitos producidos por este tipo de flujo son muy similares a los que se originan por flujo de detritos; sin embargo, están constituidos por sedimentos predominantemente arenosos y más finos.

Deslizamientos

Este proceso incluye la caída de rocas, el deslizamiento y corrimiento de tierra, e inclusive avalanchas de nieve. El tamaño del material que se transporta por este proceso es muy

variado, y van desde lodo hasta grandes bloques de roca, partes de suelo, cantidades importantes de vegetación, y ocasionalmente, automóviles y casas. Debido a que mucho del material acarreado por los deslizamientos es muy similar a los presentes en los flujos de detritos, los depósitos que ambos generan pueden ser difíciles de diferenciar en secuencias antiguas; sin embargo, una mayor proporción de bloques grandes y la mayor angulosidad de los clastos, pueden estar determinando depósitos de deslizamiento.

4.2. Cuenca del río Magdalena

La cuenca del río Magdalena está formada por rocas con edades desde el Precámbrico hasta el Terciario. Estas rocas se presentan cubiertas parcialmente por depósitos inconsolidados del Cuaternario. Litológicamente el territorio presenta todas las clases de rocas-ígneas, sedimentarias y metamórficas con una gran variedad de tipos y texturas.

Las unidades geológicas predominantes en la cuenca las constituyen los depósitos inconsolidados o formaciones superficiales del Cuaternario, que cubren un 26% del área de la cuenca. Las unidades rocosas que predominan son las del Terciario (24%), Cretáceo (18%) y Jurásico (18%) y en menor proporción las precámbricas (3%) y las triásicas (1.9%).

A continuación, se presenta una breve descripción de las unidades cronoestratigráficas por unidades de roca y depósitos consolidados o formaciones superficiales, las cuales son de gran interés para este estudio.

En la cuenca Magdalena-Cauca los depósitos inconsolidados o formaciones superficiales del Cuaternario son las unidades litológicas de mayor extensión y se presentan cubriendo parcialmente rocas más antiguas que se distribuyen como masas discordantes sobre toda la Cuenca, particularmente en el valle del río Magdalena y en la parte norte de la cuenca. Los predominantes son los de origen aluvial que se manifiestan en forma de lechos activos, llanuras, deltas, abanicos, terrazas y planicies aluviales. Otros depósitos de origen coluvial, no representativos a escalas regionales por su pequeña dimensión, se presentan sobre las zonas montañosas y de piedemonte de las tres cordilleras. Depósitos de origen glaciar y fluvioglaciar se presentan sobre las laderas altas, generalmente por encima de los 2.500 metros de altura sobre el nivel del mar.

Se ha estimado por mediciones del transporte en suspensión y formulaciones que el transporte total de sedimentos del río es del orden de 200 millones de ton/año de los cuales el 80% corresponde a limos y arcillas y 20% en arenas.

La Tabla 2 muestra el área de drenaje y las principales características climáticas en hidrográficas de las zonas en las que se divide el río Magdalena.

Tabla 2. Área de drenaje y las principales características climáticas e hidrográficas de las zonas en las que se divide el río Magdalena.

	A ⁽¹⁾ (km ²)	P ⁽²⁾ (mm a ⁻¹)	Q ⁽³⁾ (m ³ s ⁻¹)	R ⁽²⁾ (mm a ⁻¹)	R/P ⁽²⁾ (-)	Sa ⁽³⁾ (x10 ³ t d ⁻¹)
Alto Magdalena ^a	55,937	1,535	1,341	901	0.59	148.2
Medio Magdalena ^b	83,514	2,185	4,224	1,259	0.58	189.2
Bajo Magdalena ^c	43,360	1,632	7,106	702	0.43	380.6

Nota: A = área de la cuenca medida en la estación hidrológica de referencia, P = precipitación promedio anual, Q = caudal promedio, R = escorrentía específica, R/P = coeficiente de escorrentía, Sa = transporte promedio de sedimentos en suspensión.
Fuente: ⁽¹⁾ IDEAM, 1995; ⁽²⁾ IDEAM, 2001; ⁽³⁾ IDEAM, 2003.

Cerca del 68% de toda la cuenca del Magdalena está experimentando altas tasas de erosión desde la década de 1990. El incremento en la producción de carga de sedimentos asociada a procesos erosivos y por consiguiente el transporte de sedimentos en los últimos diez años y, por lo tanto, el ascenso en los valores netos de erosión, han sido altos y continuos en ríos como el Páez y el Yaguará en el alto Magdalena; Carare, Opón y Sogamoso en el Magdalena medio, y de carácter intenso, en la cuenca del río Cauca. Otros análisis a escala regional muestran que cerca del 42% de los bosques en la cuenca del río Magdalena han sido talados durante las últimas tres décadas a una tasa de 1.9% anual, una de las más altas de Latinoamérica y del mundo, esta situación ha generado una alta tasa de erosión y posterior transporte de sedimentos a lo largo de todo el cauce del río Magdalena, proceso que podría afectar la navegabilidad en los períodos de estiaje (IDEAM – Cormagdalena, 2011).

Para los sectores aledaños al barrio Villa Carolina, municipio de Ricaurte - Cundinamarca, en donde el Río Magdalena recibe los afluentes Sumapaz, predominan los depósitos recientes de edad cuaternaria, en la zona de la desembocadura del Río Sumapaz donde se presentan desde depósitos conglomeráticos no consolidados ubicados específicamente en la base del canal hasta depósitos de terraza en las laderas de los ríos Magdalena y Sumapaz que varían desde granulometrías finas (arcillas) hasta arenas y gravas.



Fotografía 9. Depósitos conglomeráticos desde tamaño grava a bloques (>40cm) en la base del río Magdalena sobre rocas del Grupo Honda.

Extensas zonas de los valles de los ríos Magdalena, Sumapaz y sus tributarios están cubiertas por depósitos sedimentarios aluviales. Los más antiguos han sido erosionados y presentan formas de terraza. Generalmente son depósitos de gravas y arenas, con intercalaciones limosas y arcillosas, con poca o ninguna consolidación, y selección regular a buena. El espesor de los depósitos, así como la litología de los fragmentos constituyentes son muy variables, dependiendo del área fuente y el sitio de acumulación.

Los depósitos recientes de edad Cuaternario fueron depositados por dinámica de los sistemas fluviales presentes en la zona, lo que indica un movimiento lateral activo de los canales junto con sus llanuras de inundación, que es evidente en el estudio geomorfológico y de fotografías aéreas y también en las estructuras sedimentarias presentes en los depósitos que afloran a orillas del cauce.



Fotografía 10. Depósitos de terraza en el costado occidental del río Magdalena en el área de barrio Villa Carolina. Predominan las arenas de tamaño fino, limos y arcillas.

4.3. Cuenca del río Sumapaz

El río Sumapaz es uno de los más importantes de Cundinamarca. Está localizado a 98 km al sur occidente de la capital Bogotá, muy cerca de la desembocadura en el río Magdalena, posee una cota máxima de 323 msnm, en el Cerro el Salero y Boquerón y una mínima de 00,00 msnm en la vereda La Cascada, con una longitud de cauce de 42 km, pendiente mínima de 15% y gasto medio de 1,23 m³/s. su cuenca se encuentra entre las coordenadas 63 ° 45 ' 30'' y 63° 19' 20'' longitud Oeste y 10° 05' 30'' y 10° 29' 20'' latitud Norte. La base hidrográfica del río cubre alrededor de 480 km recibe por su margen 8 riachuelos y 4 quebradas. El régimen pluviométrico en la cuenca se caracteriza por un período de sequía de diciembre a junio y uno de lluvias entre julio y noviembre. Como la mayoría de los ríos del país que cruzan centros poblados, a la altura del municipio de Ricaurte el cauce se ve afectado por las diferentes actividades antropogénicas que se llevan a cabo en sus cercanías: desarrollos urbanos, industriales, agropecuarios y todas las consecuencias ambientales que conlleva cada uno de ellos.

Según un informe del año 2010, en la cuenca del Sumapaz se encontraban asentados 31.920 habitantes, una extensión total de 201 km², extensión área urbana: 16 Km², extensión área rural: 185Km² altitud de la cabecera municipal (metros sobre el nivel del mar): 323 los cuales 51,9 % corresponden a la población rural y 48,1 a la urbana. Sin embargo, en los últimos

años el número de habitantes se ha incrementado (CTI-MARNR, 1999), agudizando los problemas ambientales.

4.4. Análisis Sedimentológico

La toma de datos sedimentológicos se encaminó en identificar cada una de las variaciones texturales y geométricas, esto con el fin de identificar áreas y patrones de deposición relacionados a procesos de inundación para el área de estudio.



Fotografía 11. Identificación de sedimentos y estructuras asociadas con llanuras de inundación, sector Barrio Villa Carolina.

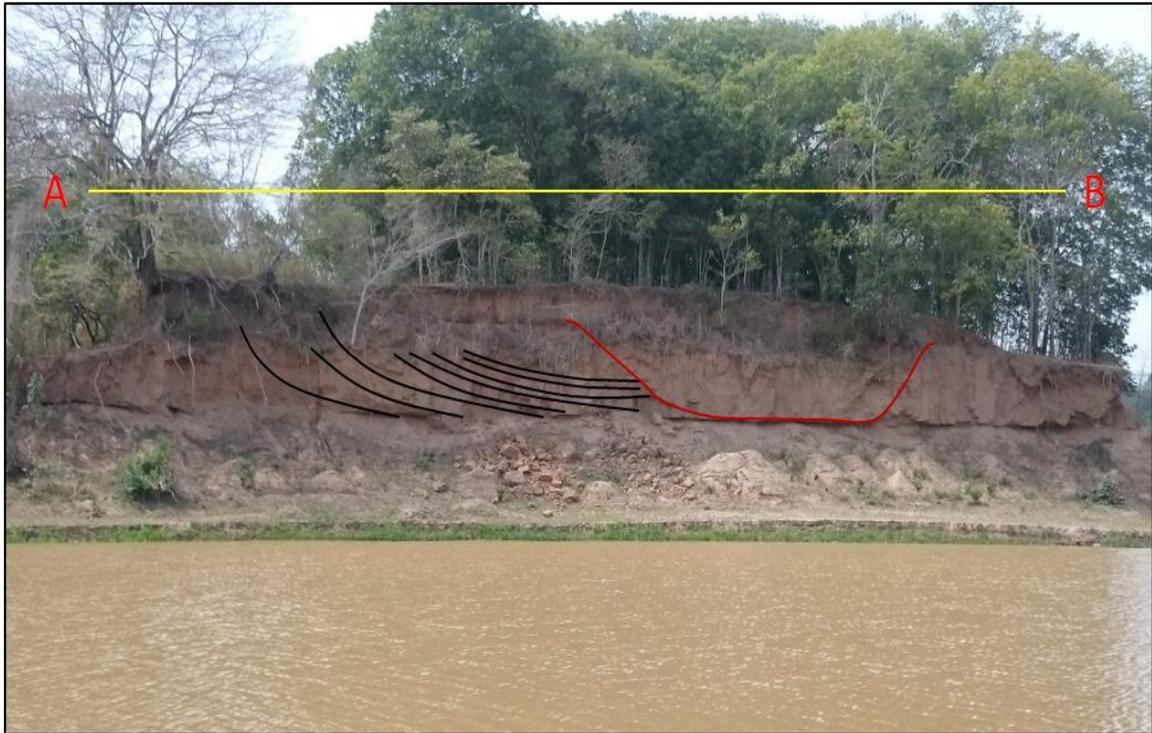


Fotografía 12. Identificación de sedimentos y estructuras asociadas con llanuras de inundación, sector Barrio Villa Carolina.



Fotografía 13. Identificación de sedimentos y estructuras asociadas con pulsos de inundación, diferenciación del sorteamiento de la granulometría, sector el Cádiz, Puerto Peñalisa.

A continuación, se muestra la sedimentación del antiguo paleocanal del río Sumapaz:



Fotografía 14. Sección A-B. Afloramiento de terrazas depositadas por el río Sumapaz en el año 1954 (Figura 15), presencia de estructuras sedimentarias de estratificación cruzada y el paleocanal del río.

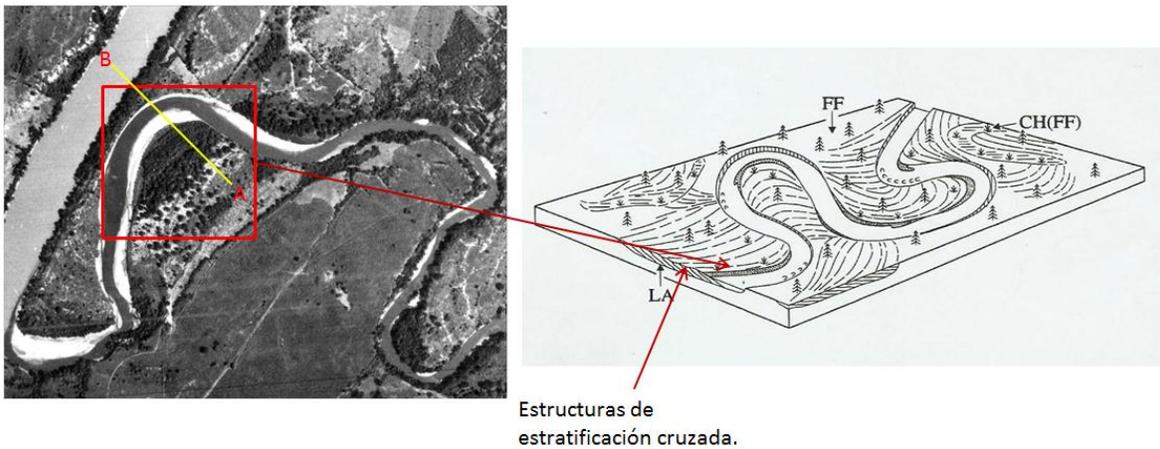


Figura 15. Fotografía aérea de la desembocadura del río Sumapaz, enero 1954. Comparación de la dinámica fluvial de los meandros y sus depósitos sedimentarios con estructuras de estratificación cruzada. Localización de la sección actual del río A-B m (foto C-686, 1954. Diagrama tomado y modificado Miall 1985).

La presencia de estructuras sedimentarias de estratificación cruzada en las laderas del río Sumapaz con dirección de buzamiento N60°W evidencian un abrupto cambio en la dirección del río en el pasado, donde este presentaba meandros de extensión considerable cercanos a su desembocadura en el río Magdalena con dirección aproximadamente perpendicular a la actual; estas características permiten observar la fuerte dinámica del río dentro de un corto lapso de tiempo.

4.5. Análisis morfoestructural

De acuerdo con Hernández et al. (2008) una de las principales direcciones “científicas” de las Geociencias contemporáneas lo constituye la geomorfología estructural, cuyos objetivos están dirigidos a la valoración de la influencia geológico-tectónica en la conformación de la estructura del relieve moderno. En el análisis morfoestructural se aplicaron los siguientes métodos:

- I. Interpretación estructuro-geomorfológica de las fotos aéreas para la delimitación de las estructuras geológicas con expresión geomorfológica.
- II. Análisis de los morfoelementos lineales del relieve, con el fin de complementar el inventario de fallas geológicas reflejadas en el relieve y de los morfoalineamientos.
- III. Evaluación morfométrica del relieve (ángulo de inclinación de las pendientes, densidad de disección y energía del relieve).
- IV. Análisis del espectro de niveles geomorfológicos y sus deformaciones neotectónicas, para establecer los pisos altitudinales de las categorías básicas del relieve (montañas, lomeríos y llanuras).
- V. Interpretación morfotectónica del relieve con vistas a determinar el mosaico espacial del plano morfoestructural.
- VI. Análisis de los diseños de los sistemas orográficos (configuración y orientaciones) para complementar los criterios morfoestructurales.



Fotografía 15. Identificación morfoestructural, reconocimiento de diferentes niveles de terrazas asociadas al río Sumapaz.

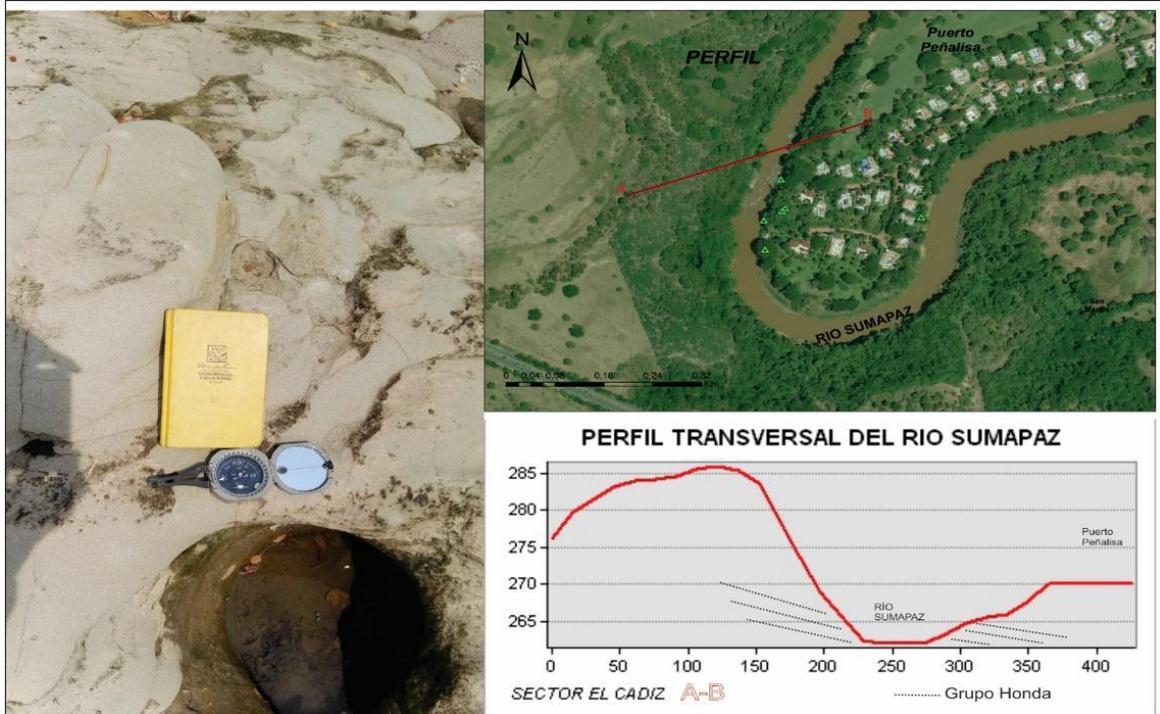


Figura 16. Perfil transversal del río Sumapaz. Imagen izquierda: Fotografía de campo para el grupo Honda. Imagen superior derecha: Vista de planta con ubicación del perfil. Imagen inferior derecha: Vista de perfil.

Comparación de los datos geomorfológicos con la estructura geológica, tomando como base la caracterización geológica de este trabajo. A los efectos morfoestructurales, las estructuras geológicas sin expresión en el relieve fueron discriminadas en el análisis por considerarse carentes de actividad moderna.

Se fundamentó en el reconocimiento de estructuras que permitan interpretar diferentes terrazas de inundación, reconocimientos de escarpes de erosión, cárcavas de socavación, canales antiguos, problemas de estabilidad de laderas, control litológico-estructural de los principales cauces, entre otros.



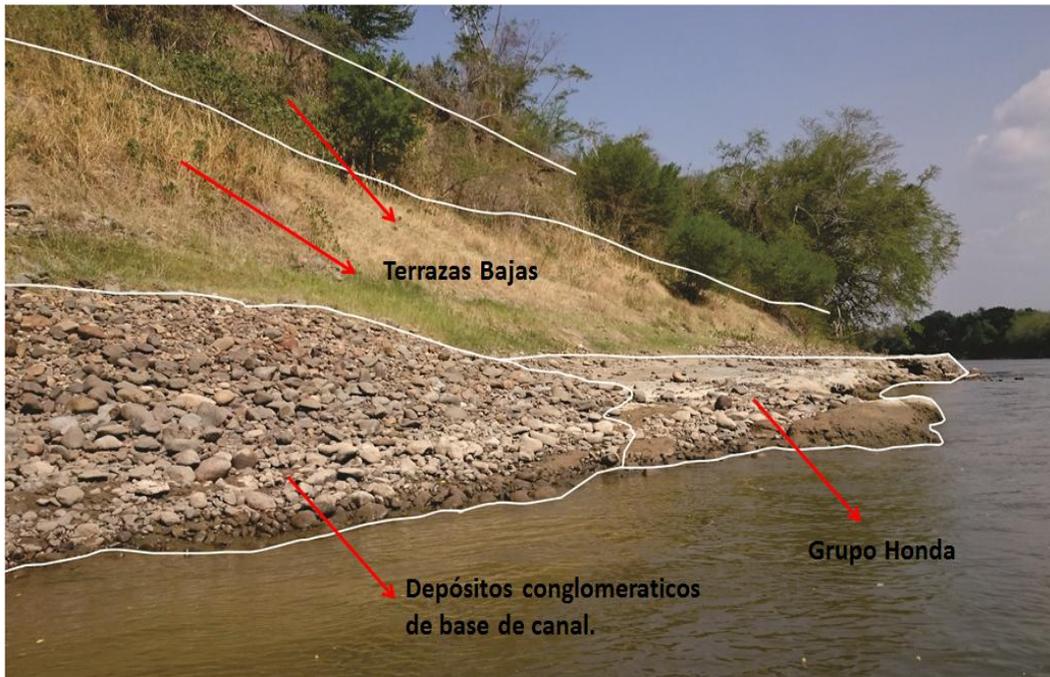
Fotografía 16. Identificación morfoestructural, reconocimiento de diferentes niveles de terrazas.



Fotografía 17. Identificación morfoestructural, reconocimiento de cárcavas por socavación.



Fotografía 18. Identificación morfoestructural río Magdalena. Reconocimiento de terraza primaria.



Fotografía 19. Identificación morfoestructural río Magdalena. Cauce actual, cauce normal (gravas) y terrazas primaria y secundaria.



Fotografía 20. Identificación morfoestructural diferentes niveles de terrazas aluviales. (Barrio Villa Carolina).

4.5.1. Perfiles del terreno

A partir del modelo de elevación digital se generaron perfiles transversales a lo largo del Río Magdalena en su trayecto por el Municipio de Ricaurte, en estos perfiles se observan los cambios de pendiente y por ende los cambios en la composición del terreno y como afecta la dinámica fluvial cada uno de estos intervalos.

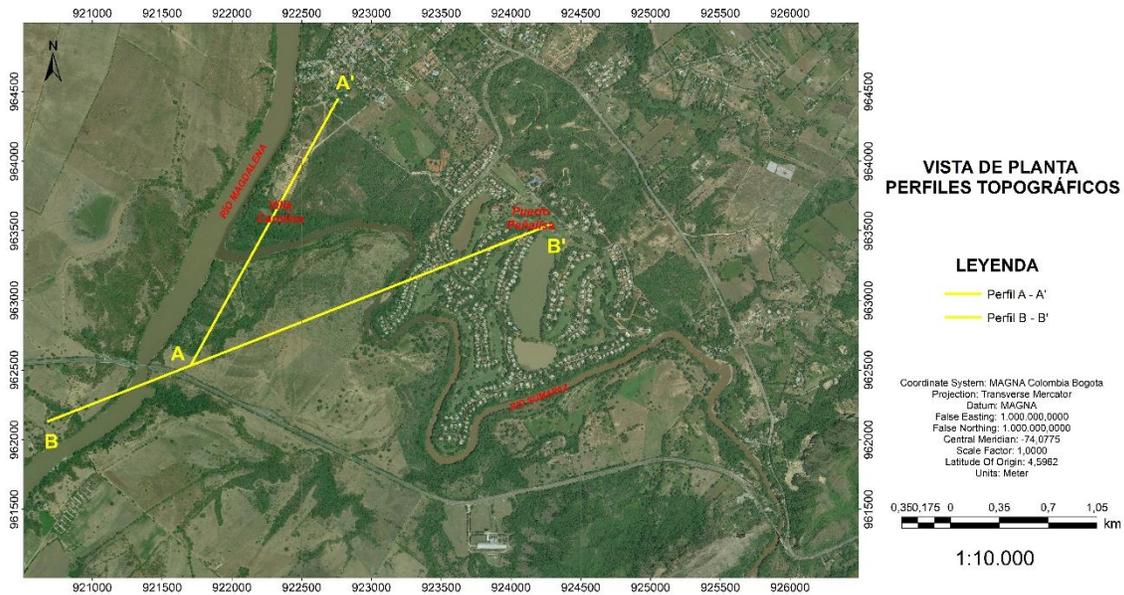


Figura 17. Perfiles sobre el terreno en vista de planta. Ortoimagen IGAC 2015

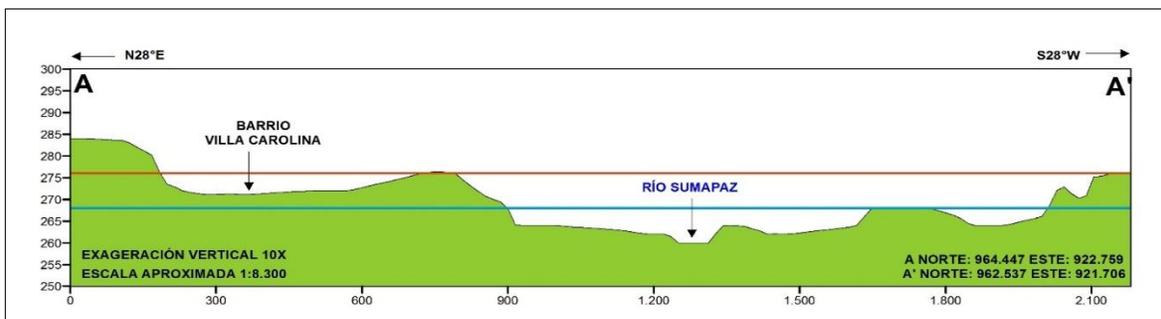


Figura 18. Perfil Área del barrio Villa Carolina. Fuente propia.

En la Figura 18, se observa la morfología de la zona en la que se encuentra el barrio Villa Carolina, además se muestran 2 niveles de inundación, la línea azul muestra una proyección de inundación de 8 metros, la línea roja ilustra una proyección de inundación de 16 metros,

en este sector se aprecian los 2 niveles de escarpes de terraza de acumulación, un nivel de terraza de acumulación de pendiente media y corta extensión, y una terraza subreciente donde se encuentra el barrio Villa Carolina, que al estar sobre una segunda terraza disminuye la amenaza de una inundación.

En la zona del barrio Villa Carolina se observan patrones de pendientes principales, en primer lugar, se tienen los escarpes de terraza de acumulación, estos escarpes de pendientes verticales a subverticales se forman debido a que la dinámica fluvial se encuentra profundizando el cauce. En estas pendientes casi verticales se han observado pequeñas variaciones que se deben a cambios en el material que los compone, cambios en los regímenes de la dinámica del río a través de los años y cambios en los factores de erosión y sedimentación, estos escarpes ejercen control sobre el cauce del río previniendo posibles desbordes del río o inundaciones mayores.

En el tercer nivel se ubican otro escarpe de terrazas acumulativas, que se formaron hace tiempo por influencia del río, este tipo de morfología indica que el río ha sido activo y ha estado variando la posición de su cauce, esta segunda terraza puede ejercer la labor de barrera de control ante una posible máxima inundación por parte del río.

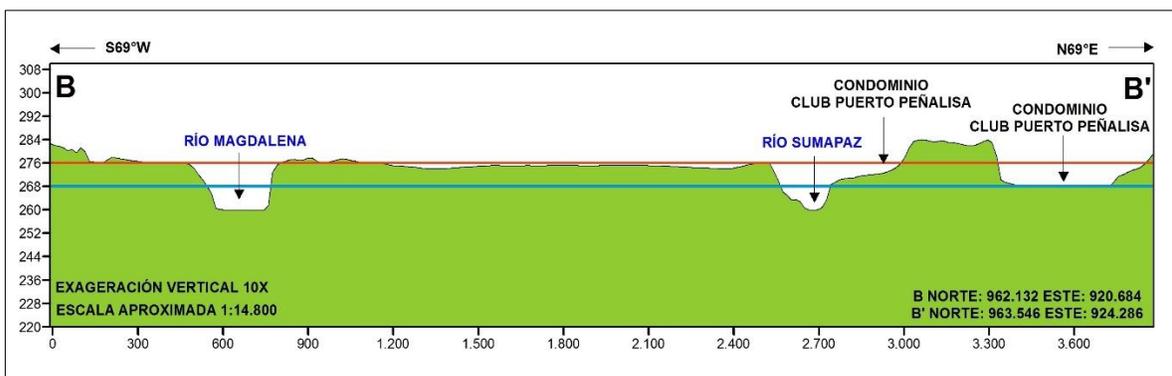


Figura 19. Perfil Área del Condominio Puerto Peñalisa. Fuente propia.

En la Figura 19, se observa la morfología de la zona para este sector determinado, además se muestran 2 niveles de inundación, la línea azul ilustra una proyección de inundación de 8 metros, la línea roja muestra una proyección de inundación de 16 metros, en el sector se aprecian las terrazas de acumulación, que tienen una pendiente suave y elongada limitadas por escarpes de pendiente alta, se generaron a partir de la acción erosiva y acumulativa del río, hacen parte de antiguas llanuras de inundación, que en periodos de intensa precipitación pueden llegar a ser inundadas de nuevo, lo cual representa una amenaza a los habitantes del sector, además se presentan las terrazas de acumulación sub-reciente, que se caracterizan por tener pendientes suaves y onduladas, estas terrazas se formaron por la acción erosiva del río tiempo atrás, se encuentra limitada usualmente por escarpes pronunciadas, las superficies de estas terrazas son usualmente más consistentes debido a su antigüedad.

5. GEOMORFOLOGÍA

Para esta temática se requirió generar el mapa geomorfológico a escala 1:2.000 (Anexo 2) de la zona de estudio, mediante la aplicación de la metodología para la generación de mapas geomorfológicos escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano (2012). Dentro de este mapa se busca definir los atributos de morfogénesis, morfometría y morfocronología.

La morfogénesis corresponde al origen de las formas del terreno, es decir, las causas y procesos que dieron la forma al paisaje. El origen del paisaje depende de los procesos endogenéticos y la modificación de los agentes exogenéticos (agua, viento, hielo), que actúan sobre la superficie terrestre en diferentes proporciones e intensidades, y durante intervalos de tiempos geológicos, modelando el terreno. La información morfogenética es representada en forma de unidades geomorfológicas; los parámetros de evaluación morfométrica permiten caracterizar una geoforma en su orden espacial individual y en su entorno, la morfogénesis junto a la morfocronología recopila, explica y sintetiza la evolución geológica del relieve actual.

5.1. Unidades geomorfológicas.

En el área de estudio se identificaron diferentes ambientes morfogenéticos (denudacional, fluvial, estructural y antropogénico), cada uno de los cuales propicia la formación de geoformas específicas dependiendo de los procesos imperantes en la modelación del paisaje, de esta forma se registran unidades del ambiente estructural hacia la esquina suroriental, mientras que en el resto del área se observa un predominio de unidades fluviales, con algunas geoformas aisladas del ambiente denudacional hacia el norte, occidente y suroriente del área de estudio.

A continuación, se presentan la distribución de las diferentes unidades en el área de estudio y se detallan todas las unidades geomorfológicas encontradas en el área.:

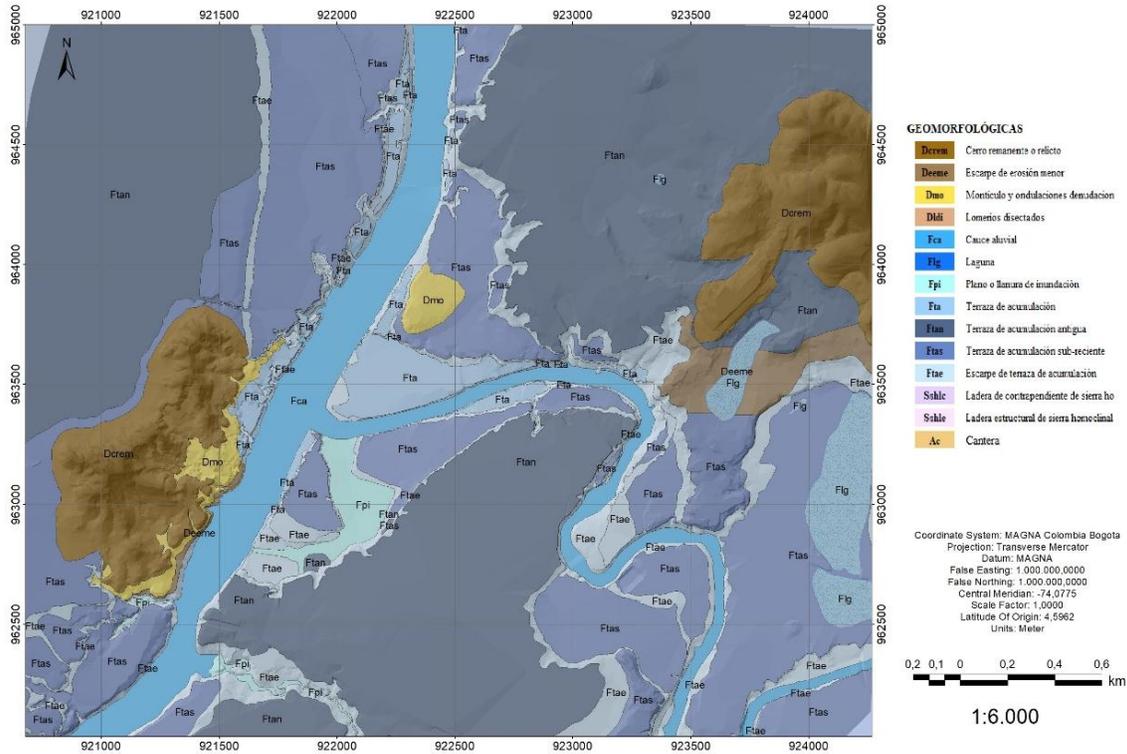


Figura 20. Unidades geomorfológicas presentes en la zona de estudio (barrio Villa Carolina, Puerto Peñalisa, barrio San Martín). Fuente propia.

5.1.1. Ambiente Denudacional

Agrupar las geoformas cuya morfología ha sido definida por la acción combinada de procesos moderados a intensos de meteorización, erosión y transporte, de origen gravitacional y pluvial que remodelan las unidades preexistentes y al mismo tiempo dan origen a otras por la acumulación de sedimento.

5.1.1.1. Cerro remanente o relicto (Dcrem)

Prominencias topográficas aisladas que sobresalen de la topografía circundante con una morfología colinada, alomada o montañosa. Presenta cimas agudas a redondeadas, laderas de longitud moderadamente corta a larga de forma convexa. Su origen se asocia a procesos de erosión y meteorización diferencial acentuada y antigua.



Fotografía 21. Vista frontal sector Loma Gorda donde se observa las unidades Cerro remanente o relicto (Dcrem) y Terraza de acumulación antigua (Ftan). Fuente propia.

5.1.1.2. Escarpe de erosión menor (Deeme)

Ladera abrupta o desplome de longitud corta a larga, forma cóncava, convexa y eventualmente recta, de pendiente escarpada a muy escarpada, originado por socavación fluvial lateral o por procesos de erosión y movimientos en masa remontantes a lo largo de un drenaje.

5.1.1.3. Lomeríos disectados (Dldi)

Prominencias topográficas de morfología alomada o colinada, con un índice de relieve bajo, de cimas redondeadas y amplias, laderas con pendientes muy inclinadas a muy abruptas de longitudes cortas a moderadamente largas de formas rectas, cóncavas o convexas. Estas geoformas son originadas por procesos de denudación intensos cuyas laderas se caracterizan por la moderada disección, generando valles en U con fondo redondeado a plano.



Fotografía 22. Unidad lomerios disectados (Dldi), desarrollada por acción denudacional de quebradas y aguas de esorrentía, sitio condominio San Marcos, municipio de Ricaurte, foto tomada al NE del municipio. Fuente propia.

5.1.1.4. Montículo y ondulaciones denudacionales (Dmo)

Elevaciones con una morfología colinada de una altura menor a 50 metros, laderas suavemente inclinadas de formas cóncavas o convexas. Son el resultado de la meteorización y erosión intensa sobre rocas blandas o friables y en sedimentos.



Fotografía 23. Unidad Montículos y ondulaciones denudacionales (Dmo), sector El Tesoro. Fuente propia.

5.1.2. Ambiente fluvial

Agrupar las geformas originadas por procesos de erosión y/o acumulación de materiales sobre las áreas aledañas a los cursos de agua, tanto en épocas de abundantes precipitaciones, como durante la dinámica normal de las corrientes perennes en la época seca.

5.1.2.1. Cauce aluvial (Fca)

Canal excavado por la erosión de las corrientes perennes o estacionales, dentro de macizos rocosos y/o sedimentos aluviales. Cuando las corrientes fluyen en zonas semiplanas a planas (llanura aluvial), los cauces son de tipo meándrico o divagante, debido al cambio súbito de la dirección del flujo.

5.1.2.2. Laguna (Flg)

Acumulaciones de agua de dimensiones inferiores, en relación con los lagos tanto en área como en profundidad. La profundidad varía de acuerdo con las condiciones ambientales del área y a su grado de colmatación (acumulación de sedimentos).

5.1.2.3. Plano o llanura de inundación (Fpi)

Superficie de morfología plana, baja a ondulada, eventualmente inundable, localiza bordeando los cauces fluviales, siendo limitado localmente por escarpes de terraza. Incluye los planos fluviales menores en formas de “U” o “V”, al igual que a los conos coluviales menores de los flancos de los valles intramontanos. Su depósito está constituido por sedimentos finos, originados durante eventos de inundación.



Fotografía 24. Unidad llanura de Inundación, desarrollada por acción del río Sumapaz en el sitio El Paso, Municipio de Ricaurte, se observan depósitos del río (arenas), extracción de material artesanalmente. (Fuente propia).

5.1.2.4. Terraza de acumulación (Fta)

Superficie elongada, plana a suavemente ondulada, modelada sobre sedimentos aluviales, que se presenta en forma pareada, limitada por escarpes de diferente altura a lo largo del cauce de un río. Su origen es relacionado a procesos de erosión y acumulación aluvial, dentro de antiguas llanuras de inundación. Su formación incluye fases de acumulación, incisión y erosión vertical. Estas terrazas pueden ser parte de cauces rectos a meándricos. Su depósito está constituido por gravas arenas, limos y arcillas, con disminución del tamaño a medida que se aleja del cauce del río.

5.1.2.5. Escarpe de terraza de acumulación (Ftae)

Plano vertical a subvertical, escalonado, excavado en sedimentos aluviales que bordean las terrazas de fluviales debido a la incisión y profundización del cauce. La altura de los escarpes puede alcanzar decenas de metros.

5.1.2.6. Terraza de acumulación antigua (Ftan)

Superficie alomada en forma de abanico de extensión kilométrica, laderas moderadamente largas, cóncavas a convexas. Se caracterizan por presentar pendientes de 5° a 10° en las partes altas, limitadas por escarpes de disección en forma de “V” que localmente pueden alcanzar inclinaciones de 20° . De manera general, se presentan colgadas, inclinadas y discordantes sobre unidades antiguas. Su origen es relacionado a la disección y tectonismo de abanicos y planicies aluviales antiguas.



Fotografía 25. Unidad Terraza de acumulación antigua (Ftan), veredas San Francisco y El Pozo. Fuente propia.

5.1.2.7. Terraza de acumulación sub-reciente (Ftas)

Superficie plana a suavemente inclinada, remanente de terrazas sub-recientes de morfología ondulada, disectadas, localmente basculadas, con inclinaciones entre 3° a 5°, aunque algunos sectores pueden alcanzar los 10°, limitada por escarpes de 5 a 20 m. Su origen es relacionado a la ampliación del valle de un río, al ganar importancia la erosión en sus márgenes.

5.1.3. Ambiente Estructural

Agrupar las geoformas originadas por procesos asociados a la dinámica interna de la Tierra, relacionados al plegamiento y el fallamiento de las rocas, cuya expresión morfológica es definida por la tendencia y la variación en la resistencia de las unidades.

5.1.3.1. Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal (Sshlc)

Superficie definida por la disposición de la pendiente topográfica en contra de la dirección del buzamiento de los estratos. Morfométricamente puede ser de longitud corta a larga, con formas cóncavas, escalonadas a festoneadas, de pendientes escarpadas o muy escarpadas, la cual se relacionan a una estructural de tipo homoclinal.

5.1.3.2. Ladera estructural de sierra homoclinal (Sshle)

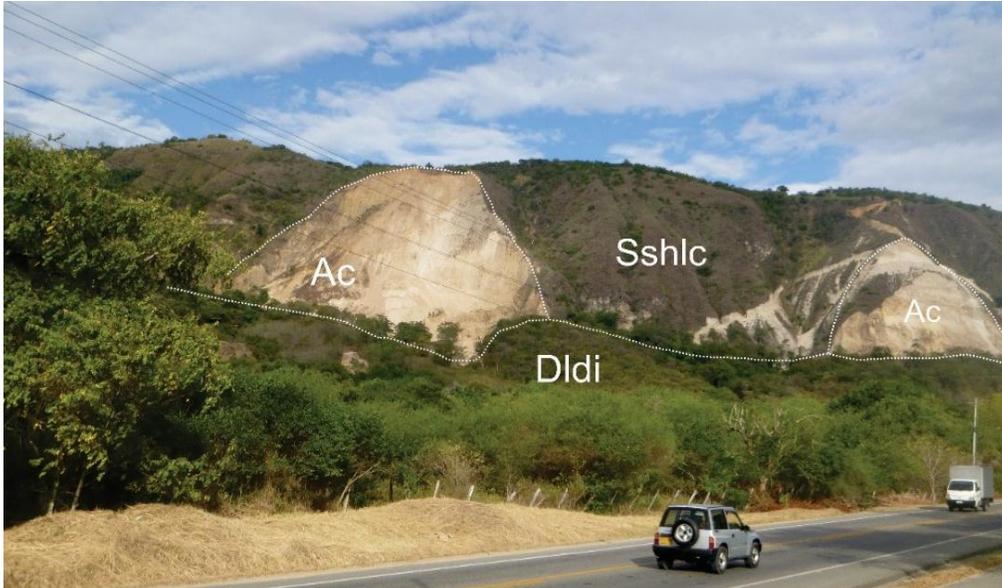
Superficie definida por la disposición de la pendiente topográfica a favor de la dirección del buzamiento de los estratos. Morfométricamente se caracteriza por ser laderas de longitudes cortas a largas, de formas convexas o rectas, pendientes escarpadas a muy escarpadas, las cuales están relacionadas a una estructural homoclinal.

5.1.4. Ambiente Antropogénico

Incluye las geoformas originadas como resultado de la intervención del hombre sobre el terreno, en la mayoría de los casos con el objetivo de realizar construcción de vivienda, obras de ingeniería, disposición de desechos o escombros y adecuación de nuevas vías, que modifica la morfología natural del terreno.

5.1.4.1. Canteras (Ac)

Excavación escarpada con altura del orden decimétrico, de formas irregulares o en terrazas hechos en laderas para la extracción de materiales de construcción como piedra, arena y grava. Se incluyen en esta definición las excavaciones realizadas para la extracción de arcillas comúnmente llamadas chircales.



Fotografía 26. Unidad canteras (Ac), Unidad ladera de contrapendiente de sierra homoclinal (Sshlc), unidad Lomeríos Disectados (Dldi), vereda El Paso, Vía Girardot – Melgar. Fuente propia.

6. DINÁMICA FLUVIAL

6.1. Análisis multitemporal

Los parámetros establecidos para interpretar las fotos aéreas son: unidades geomorfológicas, análisis multitemporal, análisis de orillas, morfodinámica en la llanura aluvial.

o Periodo 1940 – 1950

El análisis fotointerpretativo y morfodinámico del área para la década comprendida entre 1940 hasta 1950, presenta la confluencia del sistema fluvial Magdalena-Sumapaz en su desembocadura.

La foto de la Figura 21 muestra pocos cambios para el río Magdalena, a diferencia del río Sumapaz, dado que en esta zona se encuentra en su fase madura (ciclo de Davis) y presenta un patrón meandriforme que se caracteriza por su alta dinámica en corto plazo.

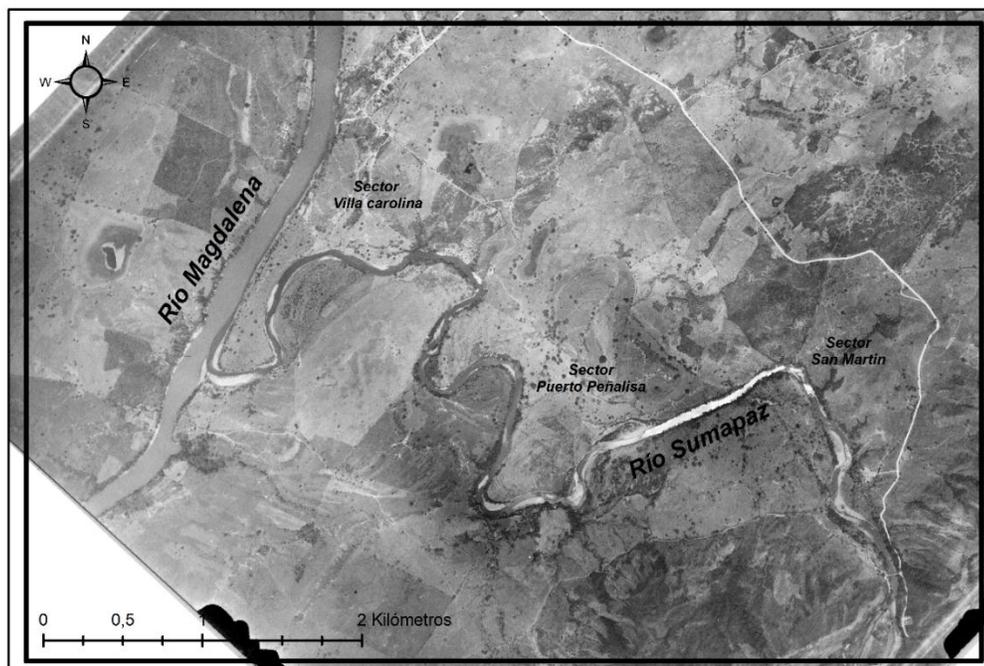


Figura 21. Foto georrefenciada, vuelo C-24/1940. Fuente propia.

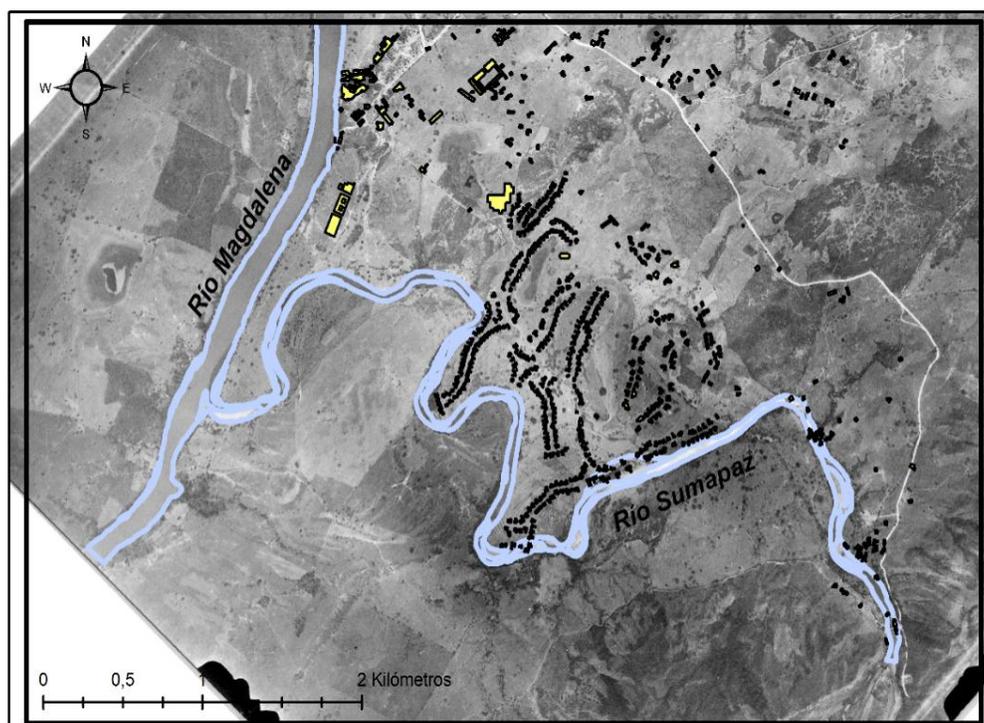


Figura 22. Foto georrefenciada, Vuelo C-24/1940, con la infraestructura actual. Fuente propia.

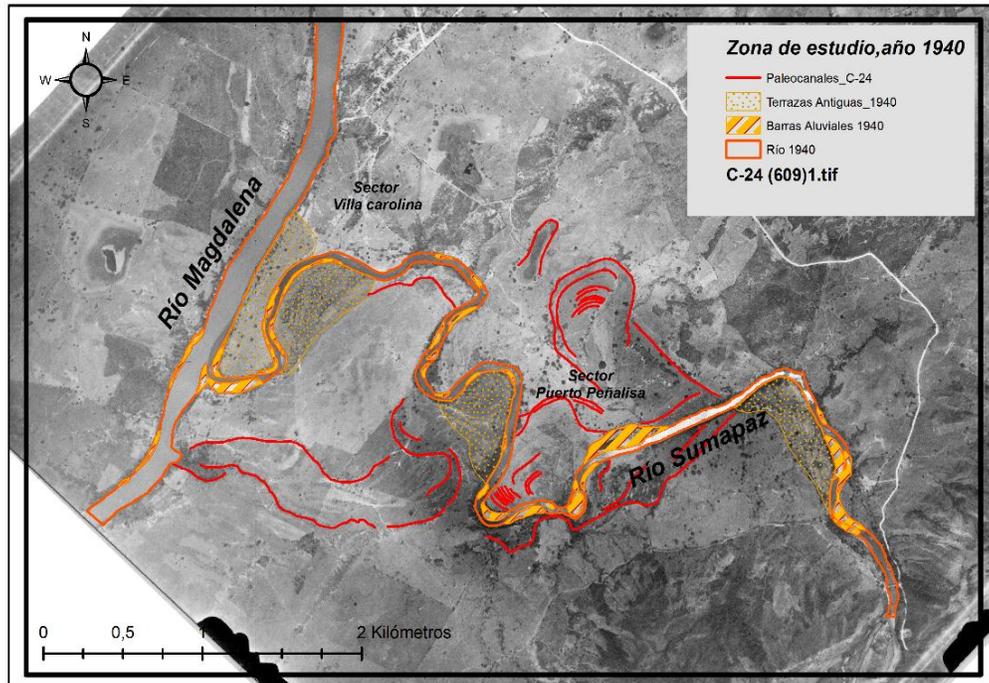


Figura 23. Interpretación fotografía 609 vuelo C-24, año 1940, zona de estudio. Fuente propia.

Para el año de 1940 no se observan cambios significativos para el rio Magdalena, a diferencia del rio Sumapaz caracterizado por la presencia de paleocanales, dejando al descubierto antiguos afluentes del rio Magdalena. En esta reconstrucción, las cicatrices previas al año 1940 son de suma importancia en la dinámica fluvial del río Sumapaz.

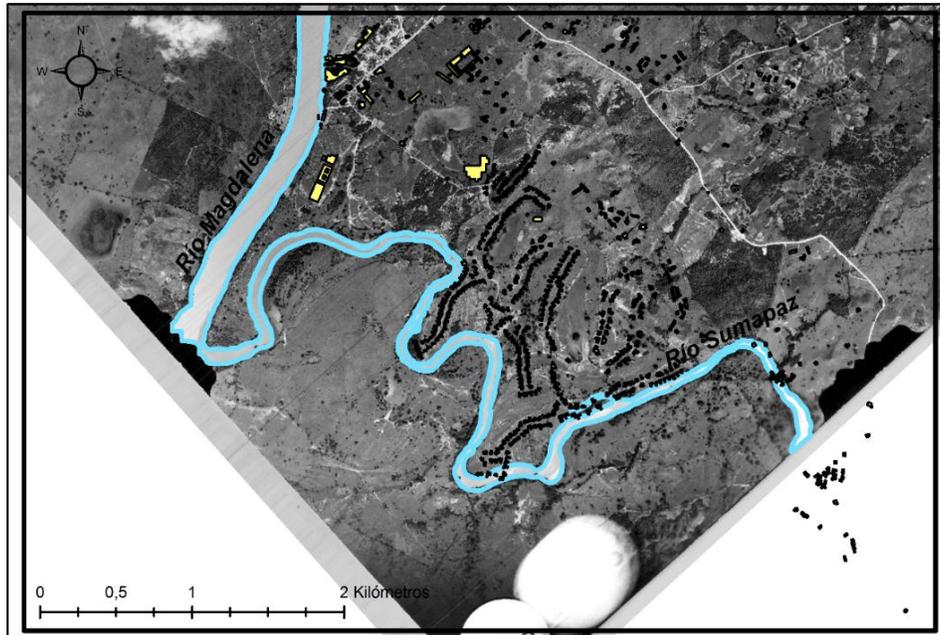


Figura 24. Foto georeferenciada, Vuelo C-24/1942, con la infraestructura actual. Fuente propia.

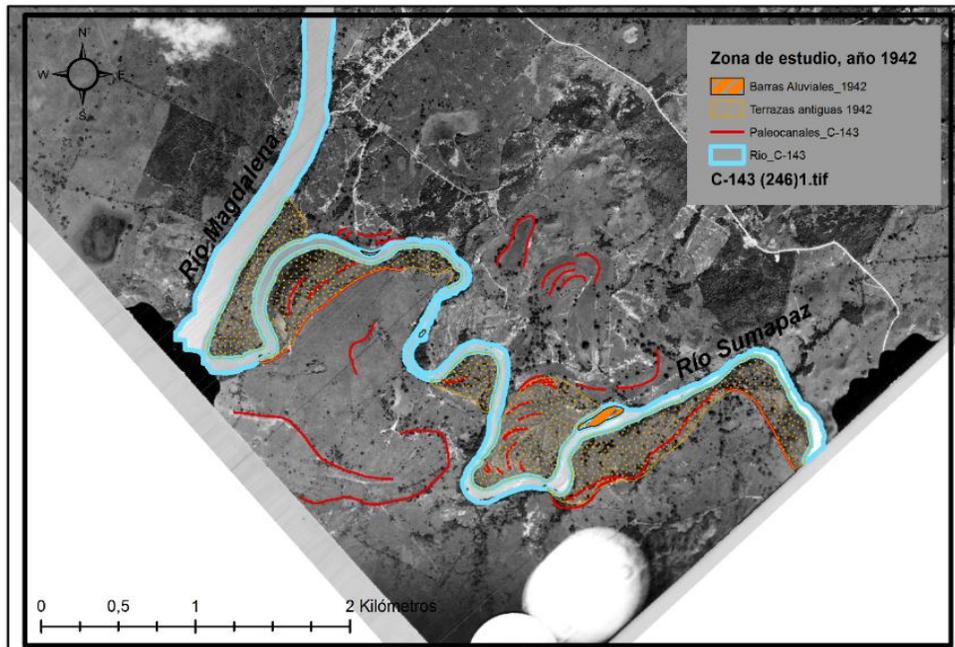


Figura 25. Interpretación fotografía 246 vuelo C-143, año 1942, zona de estudio. Fuente propia.

○ **Periodo 1950 – 1960**

El análisis fotointerpretativo y morfodinámico del área para la década comprendida entre el año 1950 hasta el año 1960, presenta la confluencia del sistema fluvial Magdalena-Sumapaz en su desembocadura.

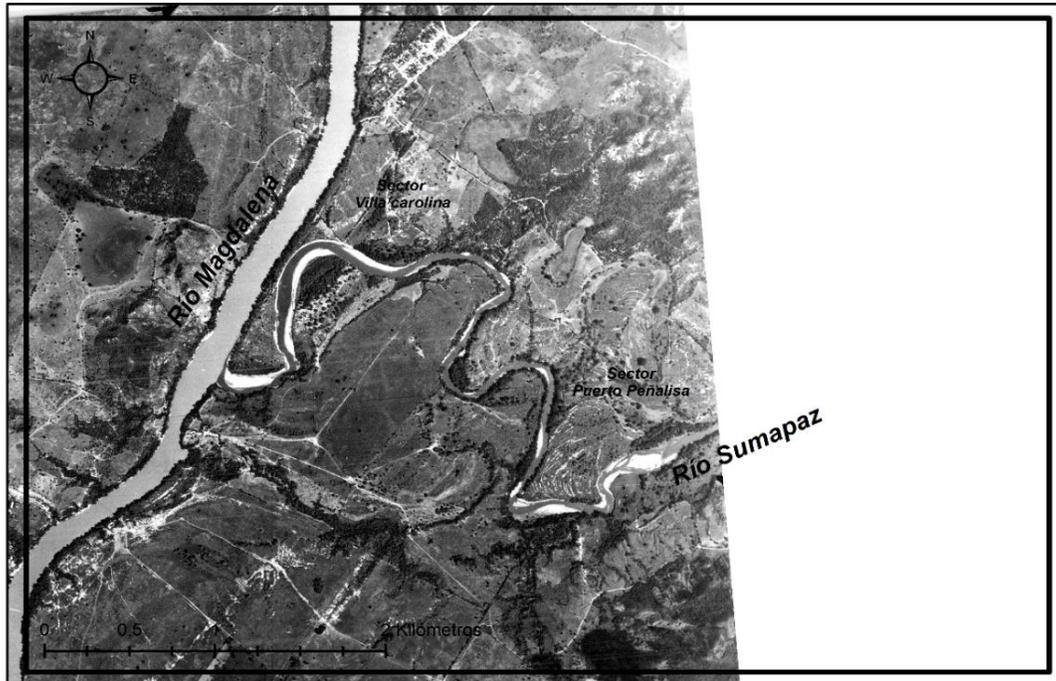


Figura 26. Foto georreferenciada, Vuelo C-686, año 1954. Fuente propia.

Se observan cambios morfológicos en las terrazas que rodean el actual barrio Villa Carolina, Puerto Peñalisa y el río Sumapaz, además de la presencia de un paleocanal en la zona sur junto a la urbanización.

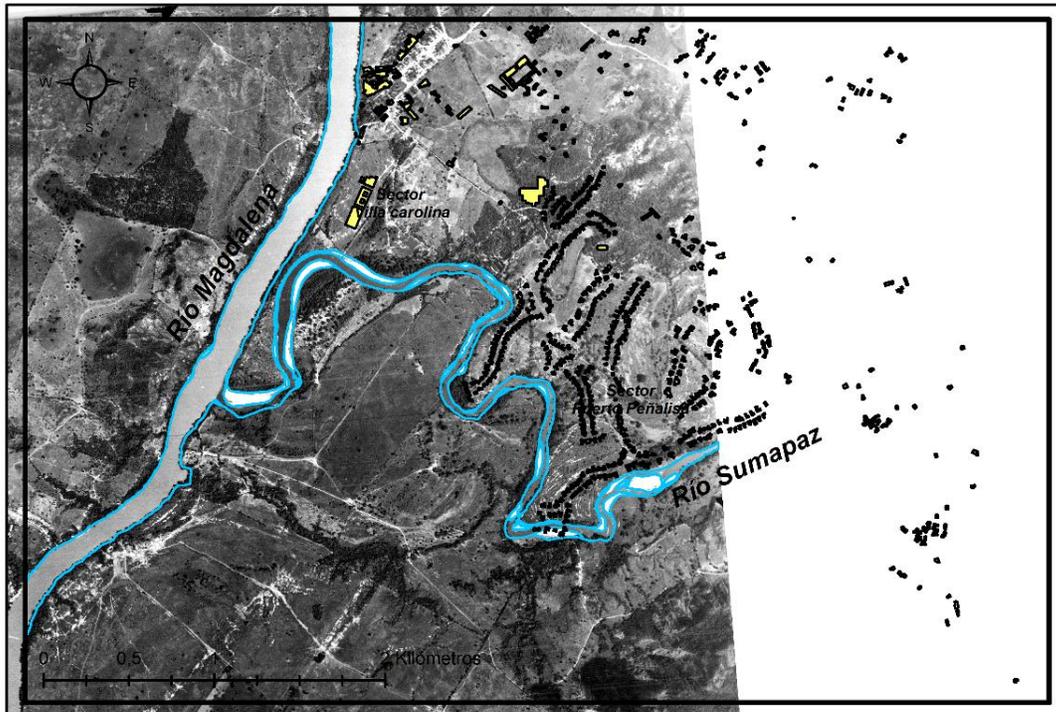


Figura 27. Foto georreferenciada, Vuelo C-686, año 1954, con la infraestructura actual. Fuente propia.

Para el río Sumapaz se observan cambios en su cauce, disminuye el canal y se encuentran acumulaciones de sedimentos en 2 sectores del condominio Puerto Peñalisa, así mismo una porción de la infraestructura actual está construida sobre una barra antigua del río Sumapaz.

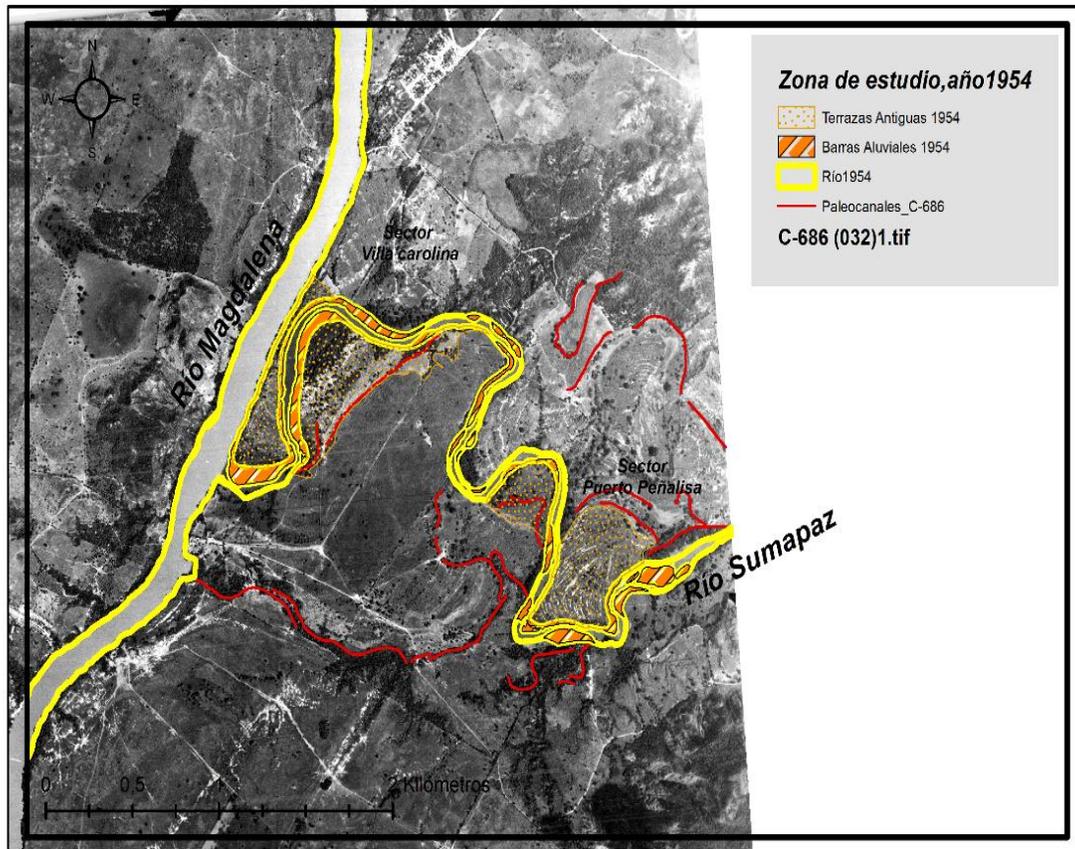


Figura 28. Interpretación fotografía 032 vuelo C-686, año 1954, zona de estudio. Fuente propia.

Para la dinámica fluvial del año 1954, el rasgo más notable es la erosión del río Sumapaz con dirección al río Magdalena, lo que se denomina *avance de barra de punta* en sistemas meándricos, además del aumento significativo en depósitos de barras.

○ **Periodo 1960 – 1980**

El análisis fotointerpretativo y morfodinámico del área para la época comprendida entre el año 1960 hasta el año 1980, presenta la confluencia del sistema fluvial Magdalena-Sumapaz en su desembocadura.

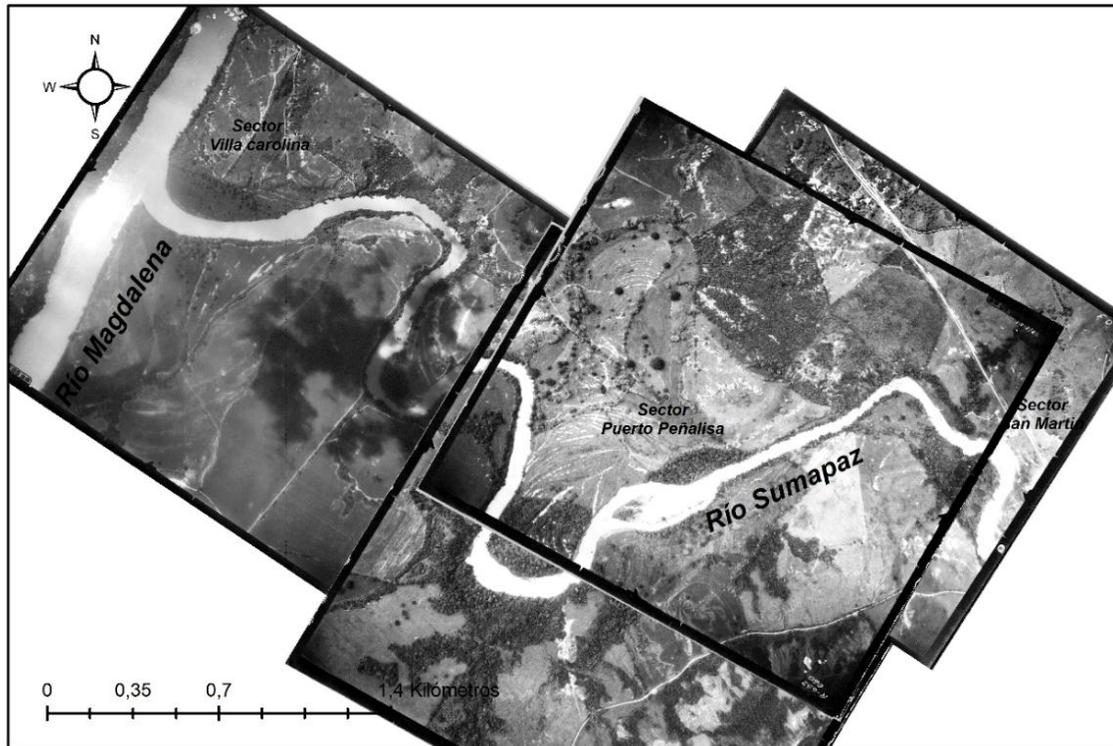


Figura 29. Foto georreferenciada, Vuelo R-632, año 1967. Fuente propia.

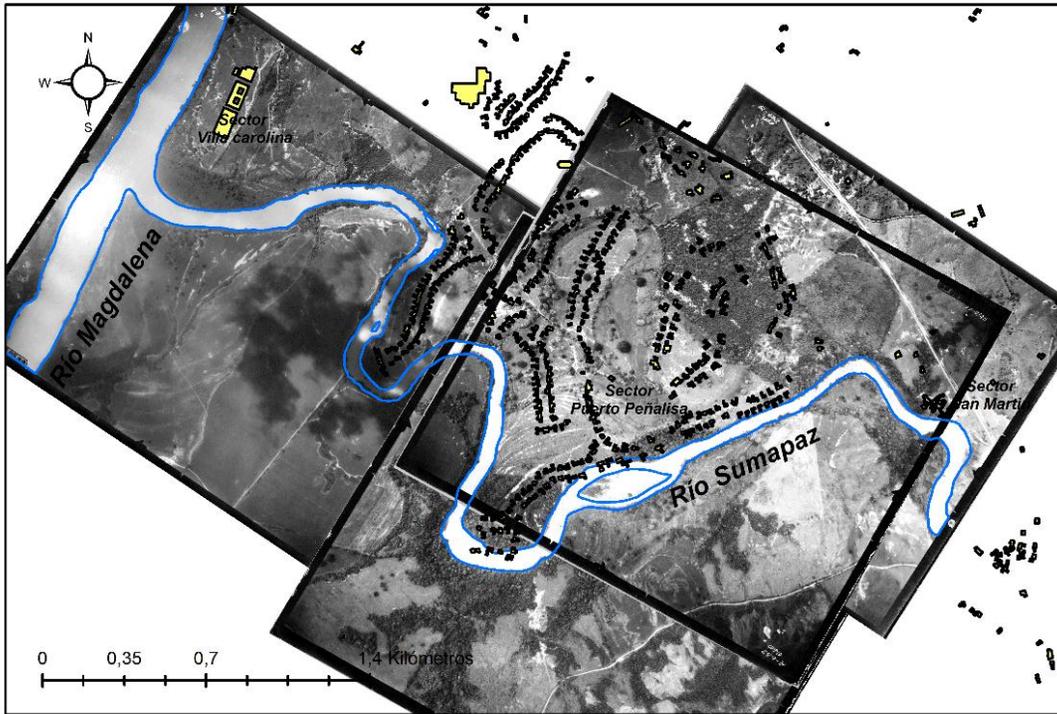


Figura 30. Fotos georreferenciadas, Vuelo R-632, año 1967, con la infraestructura actual. Fuente propia.

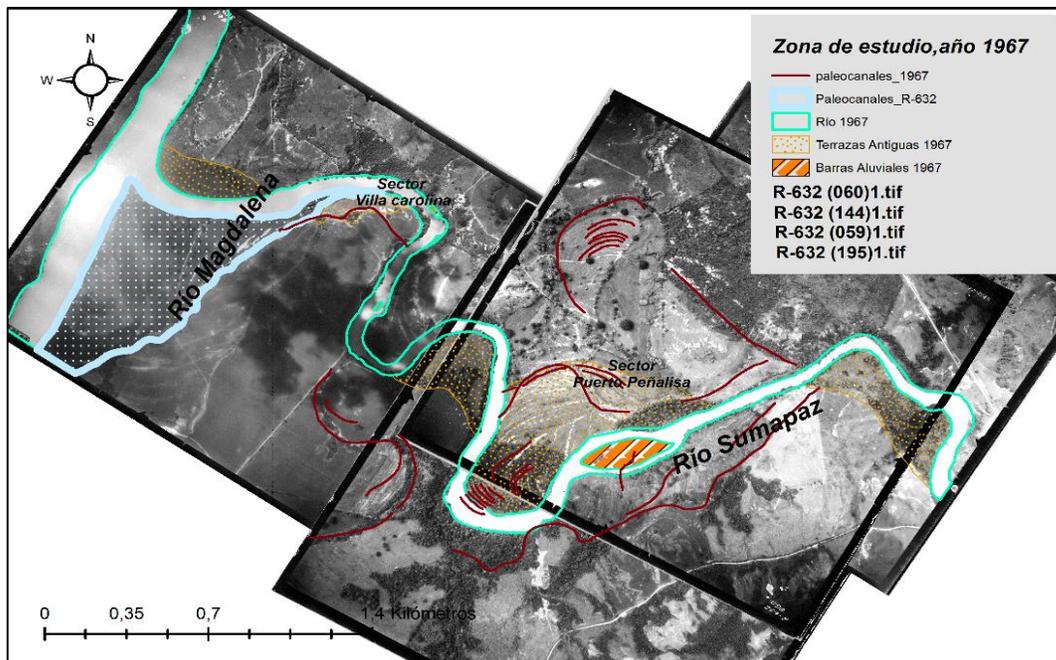


Figura 31. Interpretación fotografías 144, 059,195 vuelo R-632, año 1967. Fuente propia.

En el año de 1967 se observa un cambio abrupto en la desembocadura del río Sumapaz, donde la erosión en la barra de punta alcanzó la barrera del río Magdalena y da origen a una nueva desembocadura, dejando meandros abandonados en la parte baja del mapa (Figura 31).

○ **Periodo 1980 – 2000**

El análisis fotointerpretativo y morfodinámico del área para la época comprendida entre el año 1980 hasta el año 2000, presenta la confluencia del sistema fluvial Magdalena-Sumapaz en su desembocadura.

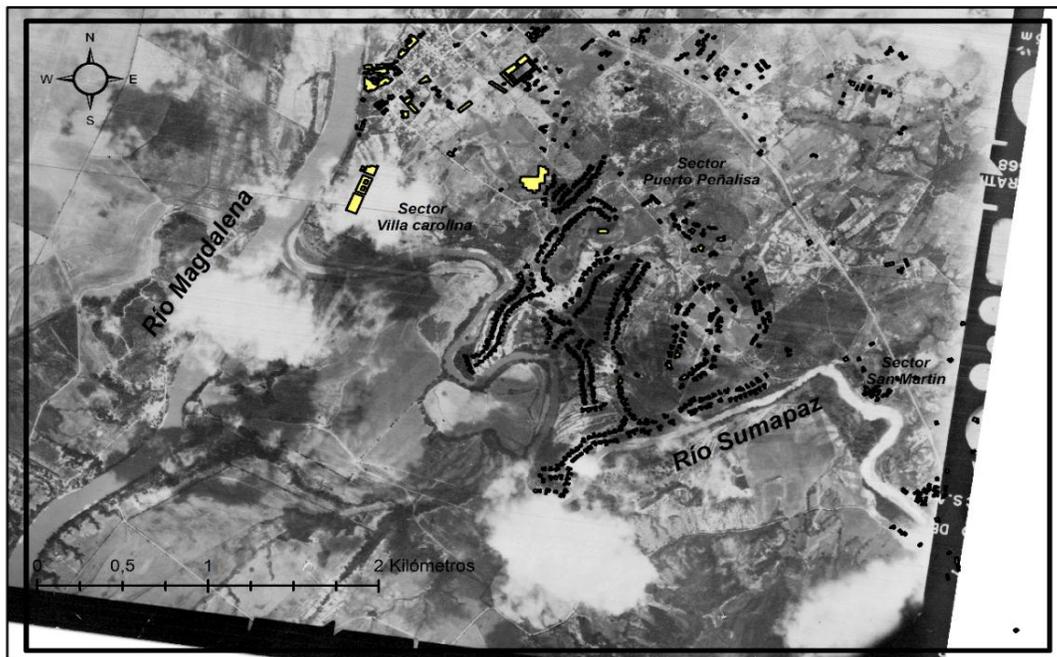


Figura 32. Foto georreferenciada, Vuelo R801/075, con infraestructura actual. Fuente propia.

La foto tiene un gran porcentaje de nubosidad en el área de estudio, se observa un aumento en el número de paleocanales, debido a la gran actividad lateral del río Sumapaz en su llanura aluvial.

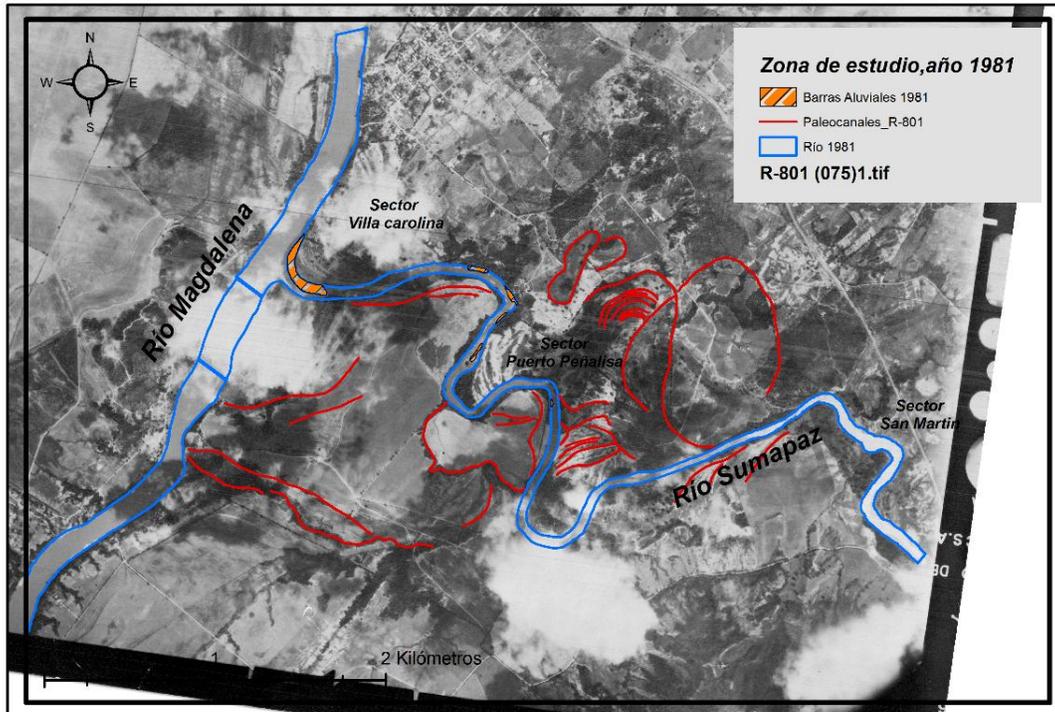


Figura 33. Interpretación fotografía 075 vuelo R-801, año 1981, zona de estudio. Fuente propia.

En el año de 1981 el río Sumapaz desarrolla depósitos de barra mientras erosiona hacia el sur justo antes de su desembocadura, erosión que se lleva a cabo en la zona de paleocanales que se pueden observar activos en el año de 1942.

El río Magdalena se mantiene estable en sus márgenes (se muestra fraccionado puesto que en su edición se asumen sus márgenes laterales, dado la nubosidad).

Se puede observar como a través del tiempo el terreno actualmente ocupado por el barrio Villa Carolina y el condominio Puerto Peñalisa está compuesto por diferentes tipos de depósitos desde paleocanales a terrazas altas, bajas y antiguas (Figura 33).

La interpretación de la foto permite observar cambios en la estructura del río Sumapaz, sus meandros son más amplios y su cauce está más controlado. La superposición de la infraestructura actual muestra el desconocimiento al planificar la construcción de las casas del condominio Puerto Peñalisa.

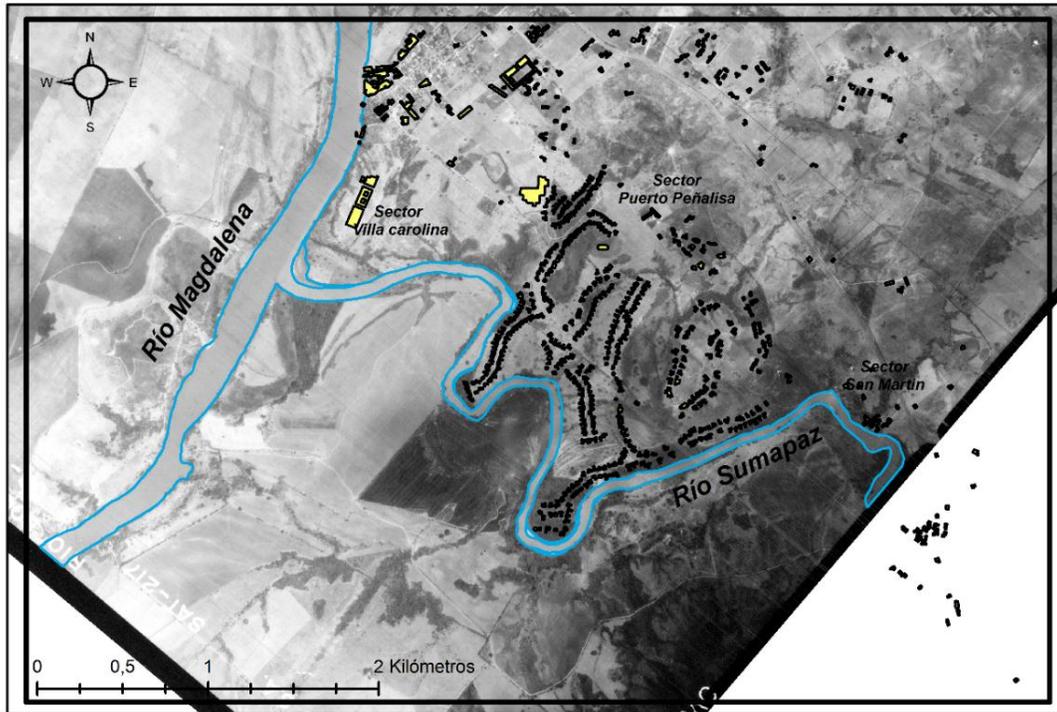


Figura 34. Foto georreferenciada, Vuelo R-929, año 1983, con infraestructura actual. Fuente propia.

La interpretación de la imagen para el año 1983 permite dimensionar la alta carga de sedimentos que lleva el río Sumapaz en su fase senil (ciclo de Davis), mostrando un aumento considerable en los depósitos de barra presentes en la zona sur del barrio Villa Carolina. También se puede apreciar un incremento en los depósitos de terrazas altas en los márgenes del río (Figura 35).

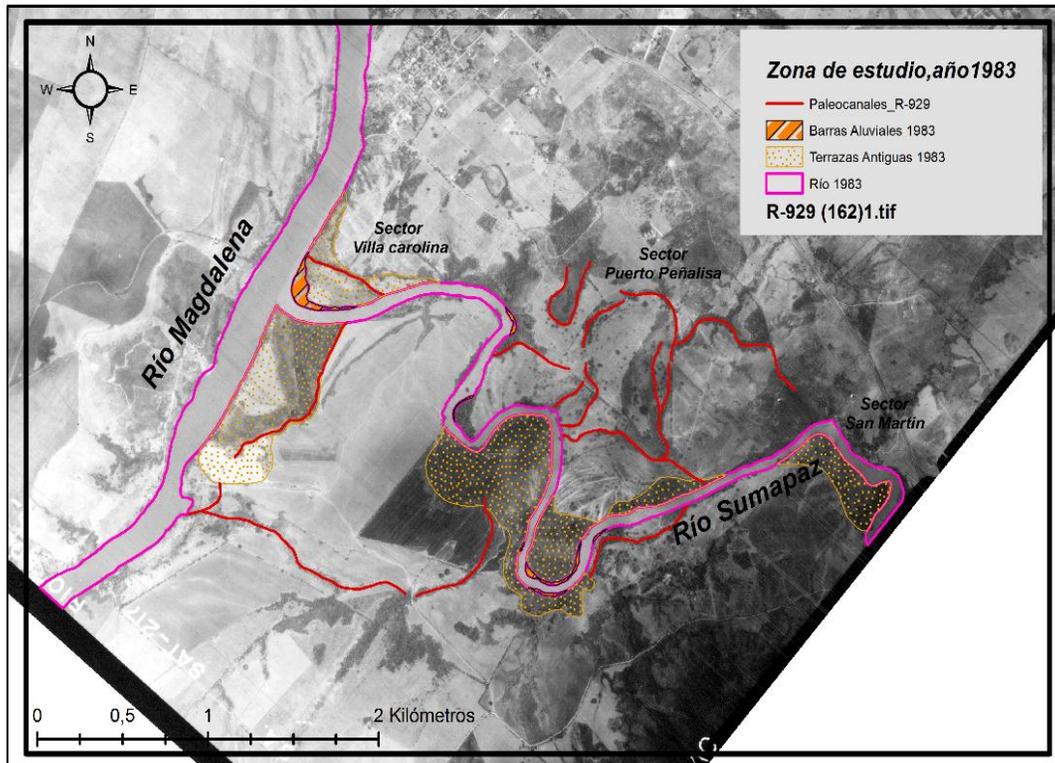


Figura 35. Interpretación fotografía 162 vuelo R-929, año 1983, zona de estudio. Fuente propia.

○ **Periodo 2000 – 2015**

El análisis fotointerpretativo y morfodinámico del área para la época comprendida entre el año 2000 hasta el año 2015, presenta la confluencia del sistema fluvial Magdalena-Sumapaz en su desembocadura.

En el sector de Puerto Peñalisa se observa la infraestructura bien definida sobre zonas de alta influencia fluvial y distribuida en los sectores de meandros abandonados, la configuración de los meandros se presta crear lagunas antrópicas, las cuales están conectadas interdigitadamente con el cauce del río Sumapaz.

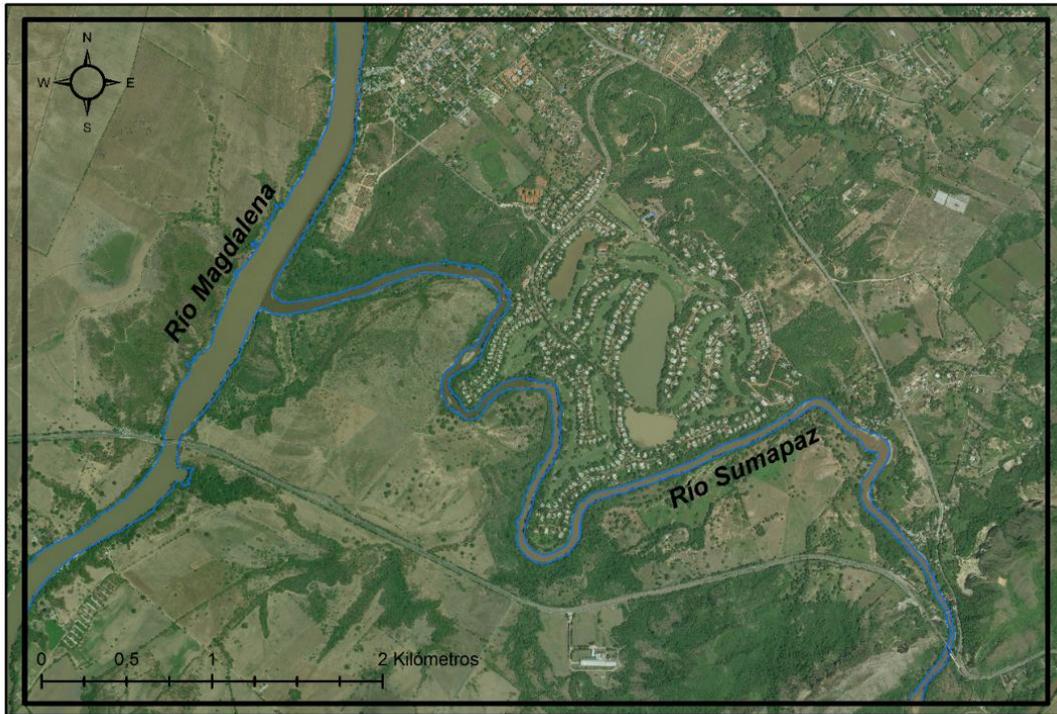


Figura 36. Ortoimagen IGAC zona de estudio, año 2015.

❖ MULTITEMPORAL DE CAUCES

La imagen aérea más actual para este estudio, correspondiente al 2015, proviene de imágenes satelitales recuperadas del servidor SAS Planet, donde es posible apreciar la configuración más reciente de los depósitos generados por los ríos en la zona (Figura 42).

El río Sumapaz continúa la erosión hacia el sur, moviendo su cauce y desembocadura cada vez más en esta dirección. Se evidencia un cambio importante en la terraza antigua donde está ubicado el barrio Villa Carolina, comparando con la foto de 1983, vemos una disminución de esta terraza en la actualidad debido a la intervención antrópica para la urbanización del área, además, el condominio Puerto Peñalisa registra muchos cambios en su terraza.

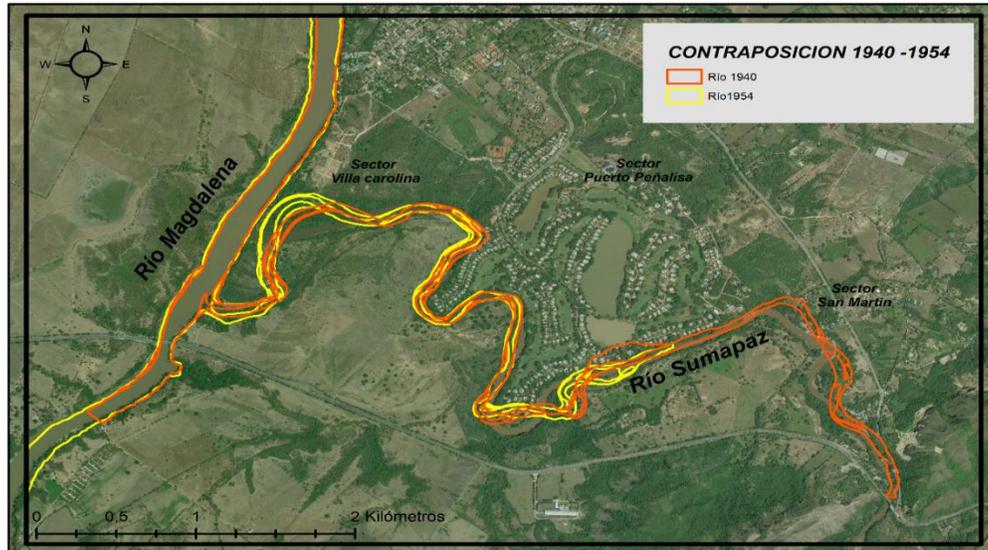


Figura 37. Representación multitemporal de los cauces de los ríos Magdalena y Sumapaz dentro de la zona de estudio para el periodo comprendido entre los años 1940 – 1954. Ortoimagen IGAC 2015.

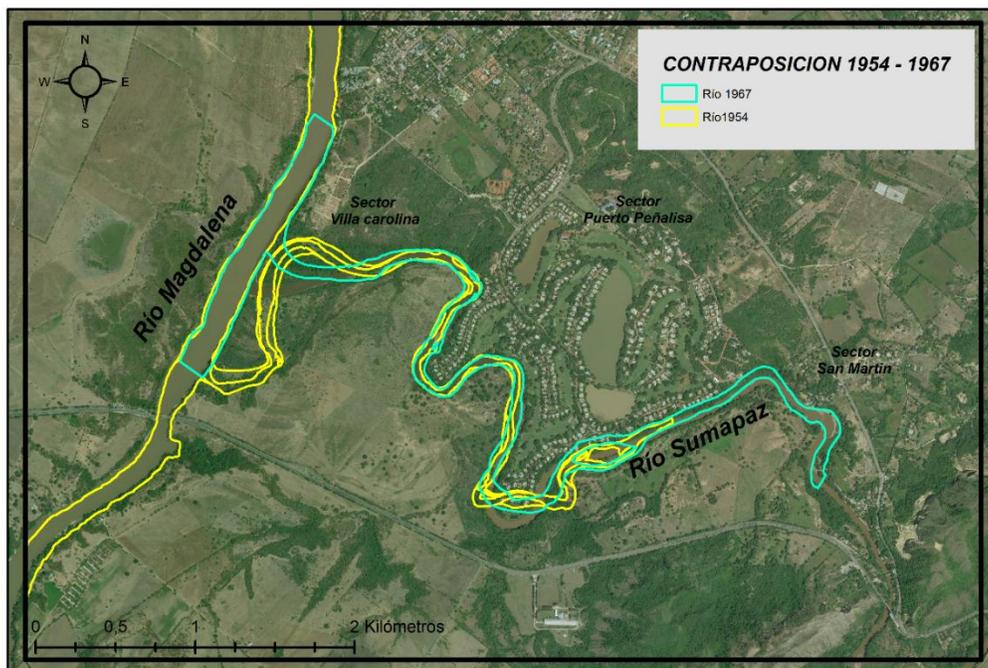


Figura 38. Representación multitemporal de los cauces de los ríos Magdalena y Sumapaz dentro de la zona de estudio para el periodo comprendido entre los años 1954 – 1967. Ortoimagen IGAC 2015.

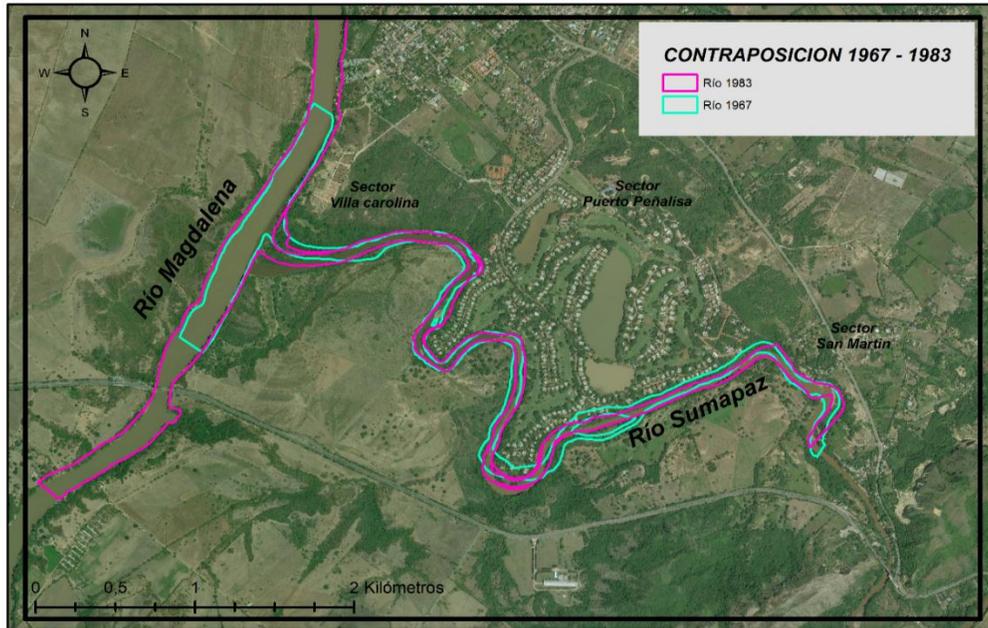


Figura 39. Representación multitemporal de los cauces de los ríos Magdalena y Sumapaz dentro de la zona de estudio para el periodo comprendido entre los años 1967 – 1983. Ortoimagen IGAC 2015.

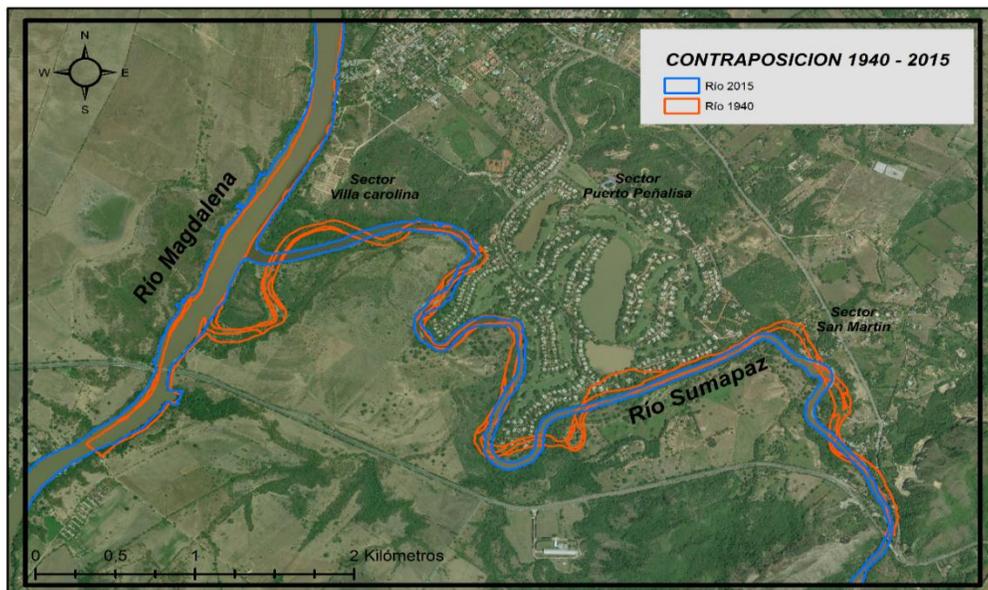


Figura 40. Representación multitemporal de los cauces de los ríos Magdalena y Sumapaz dentro de la zona de estudio para el periodo comprendido entre los años 1940 – 2015. Ortoimagen IGAC 2015.

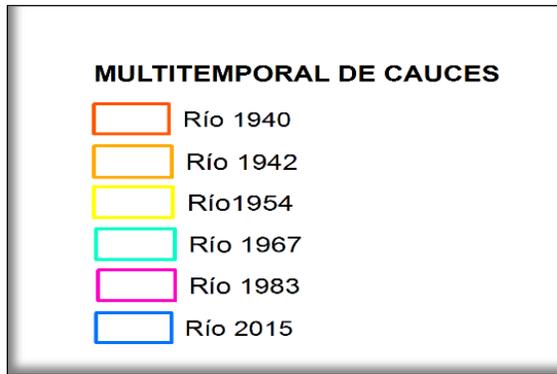


Figura 41. Leyenda del Multitemporal de cauces. Fuente propia.

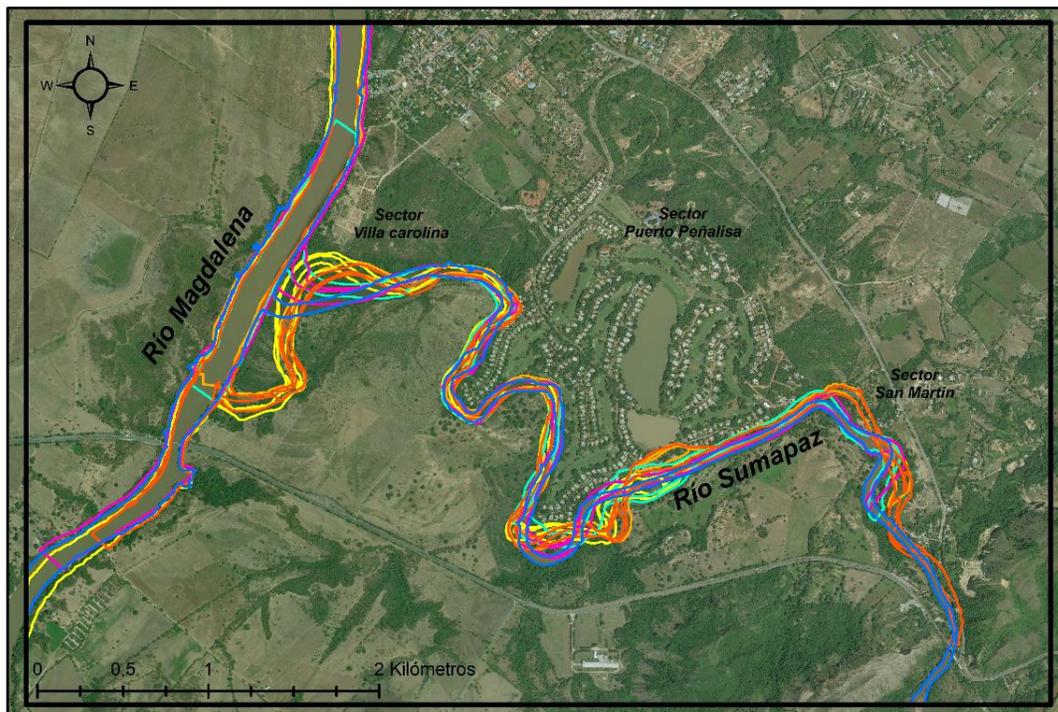


Figura 42. Imagen de satélite donde se muestra todos los cauces a lo largo del tiempo. Ortoimagen IGAC 2015.

6.2. Análisis Imagen Landsat

En este apartado se describen las características de las imágenes Landsat 3, 4, 5 y 6. Para la combinación se usaron dos bandas en la región del infrarrojo del espectro electromagnético, lo que permite apreciar el suelo expuesto y la infraestructura que se visualizan en tonos grises

y blancos, respectivamente, y la vegetación se muestra en diversas tonalidades de rojo y rosa, que varían en función del tipo y de las condiciones de la misma, significando, a su vez, que existe una diferencia en los niveles digitales (ND) de los píxeles y por lo tanto diferentes usos del suelo y tipos de vegetación; el área de estudio fue registrado en su mayoría sobre una composición en color 532 (RGB), además se ejecutan una variedad de parámetros (filtros), para mejorar la visibilidad de la imagen.

Los píxeles utilizados como áreas de entrenamiento fueron visualizados en una gráfica de características espaciales colocando la banda del visible rojo en el eje vertical y la banda del infrarrojo cercano en el eje horizontal; con ello se logró observar el grado de discriminación entre una clase y otra, e inferir el resultado de la fase de asignación al observar la sobreposición existente entre los píxeles de diferentes clases.

Durante la fase de asignación se aplicó el método de clasificación Minimum Mahalanobis Distance, que a partir de los valores medios y de una matriz varianza-covarianza de las respuestas espectrales de las áreas de entrenamiento para cada banda espectral de la composición en color, se eligen aquellos píxeles cuyos ND tengan valores semejantes a los de entrenamiento, y en función de esto se les asigna una de las categorías determinadas en la leyenda de trabajo.

El proceso de clasificación digital fue aplicado sobre el recorte completo de la imagen ya establecida, sin embargo, se utilizó únicamente el polígono correspondiente al área de estudio para realizar los análisis espectrales e incluir únicamente el área de interés y reducir, de esta manera, la desviación de valores ajenos al área en estudio que podrían modificar los resultados.

6.2.1. Índice de humedad

Para el respectivo análisis de humedad en la zona de estudio, se procesaron imágenes satelitales de diferentes décadas (algunas de ellas de baja resolución), que permiten tener el registro histórico de los cambios morfológicos y la forma en la que los diferentes tipos de terrenos captan la humedad. Las imágenes obtenidas son Landsat 8 y Landsat 7, que han sido procesadas a partir del software ERDAS y después importadas y modificadas en ArcGIS 10.2, de tal manera que la interpretación de las bandas seleccionadas, definen la humedad presente en los suelos. En general se originan varias imágenes para descartar errores de edición y se establecen parámetros visuales al ejecutar cambios de bandas espectrales.

Para obtener imágenes de buena calidad y con poca nubosidad, se procesan y se seleccionan bandas acordes, con las cuales estas imágenes nos muestren los cambios de tonalidad, asociados a zonas húmedas y secas, donde los tonos oscuros es máxima humedad y los claros son baja humedad. Además, se buscaron registros de imágenes en meses que se caracterizan por ser meses secos de poca precipitación, la mayoría de ellas fueron tomadas entre los meses de diciembre o enero.

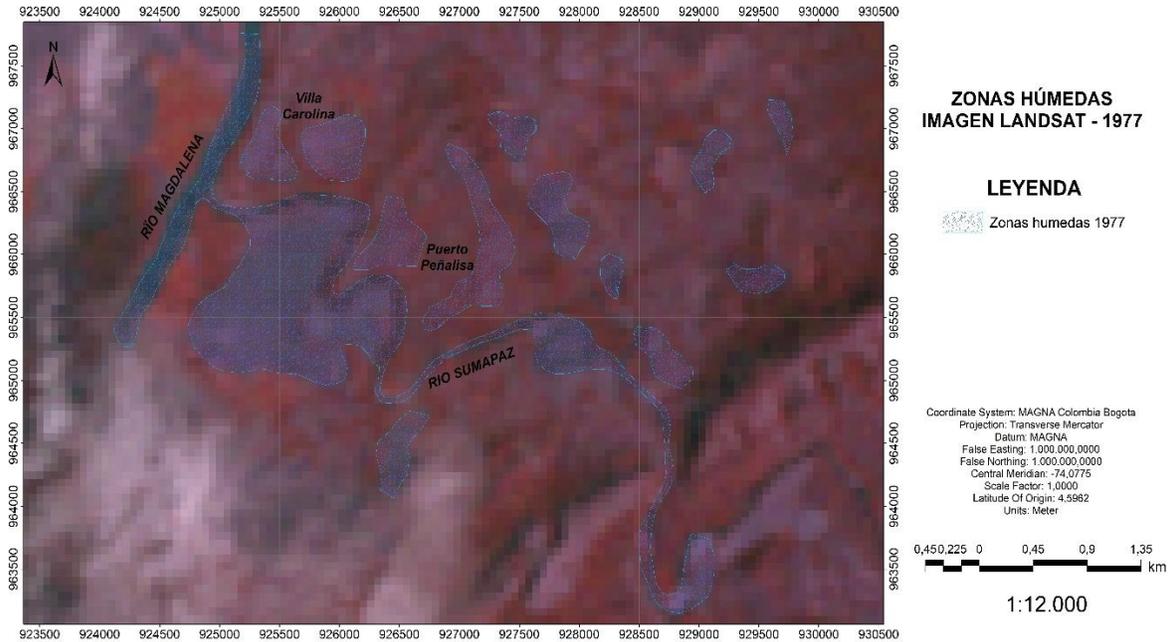


Figura 43. Imagen Landsat año 1977. Fuente: Imágenes procesadas y adaptadas; Software ERDAS, Arcgis 10.2).

El registro inicia con una imagen del año 1977, en la que se observan como las márgenes de los ríos tienen un índice muy alto de humedad, esto se debe a la densidad que bastante alta en estas áreas y la zona donde se ubica actualmente el barrio de Villa Carolina, también ha sufrido cambios diversos a través del tiempo. Es una zona que requiere un monitoreo continuo, junto con el condominio Puerto Peñalisa, que muestra niveles altos de humedad dado que el Río Sumapaz es bastante dinámico y ha inundado sus predios constantemente, y además se presenta infraestructura como lagos.

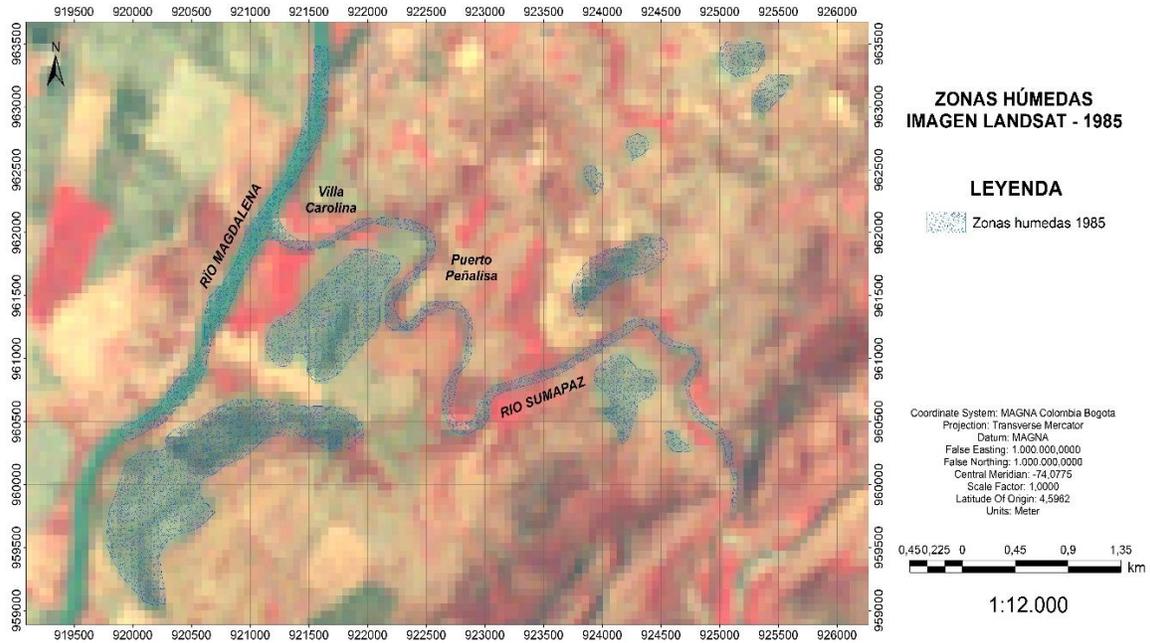


Figura 44. Imagen Landsat año 1985. Fuente: Imágenes procesadas y adaptadas; Software ERDAS, Arcgis 10.2.

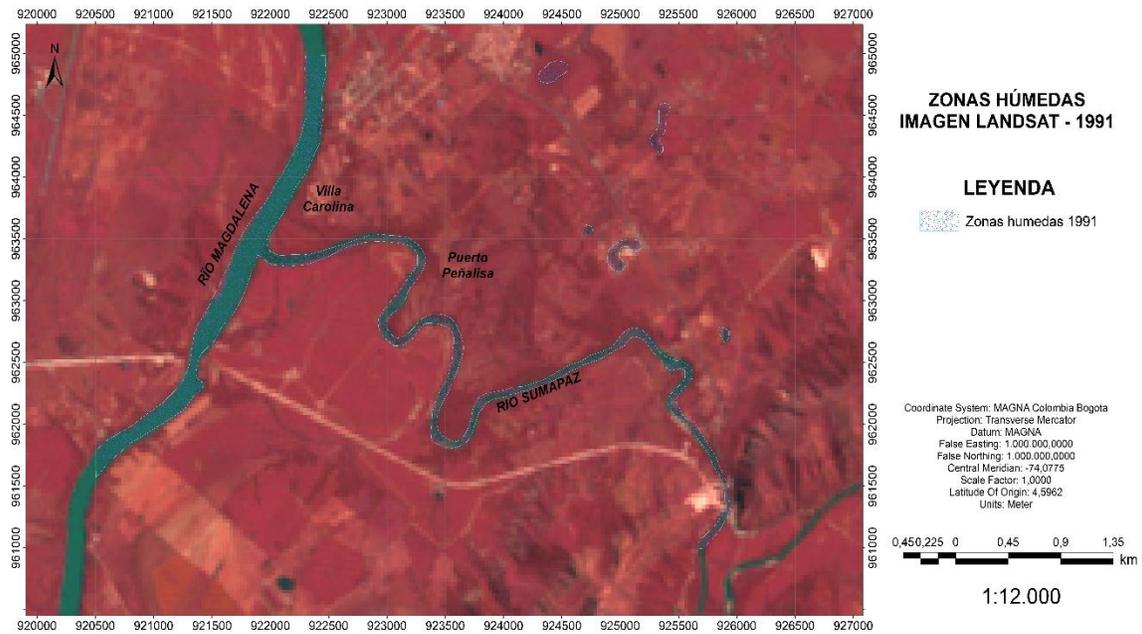


Figura 45. Imagen Landsat año 1991. Fuente: Imágenes procesadas y adaptadas; Software ERDAS, Arcgis 10.2.



Figura 46. Imagen Landsat año 2000. Fuente: Imágenes procesadas y adaptadas; Software ERDAS, Arcgis 10.2.



Figura 47. Imagen Landsat 2011. Fuente: Imágenes procesadas y adaptadas; Software ERDAS, Arcgis 10.2.

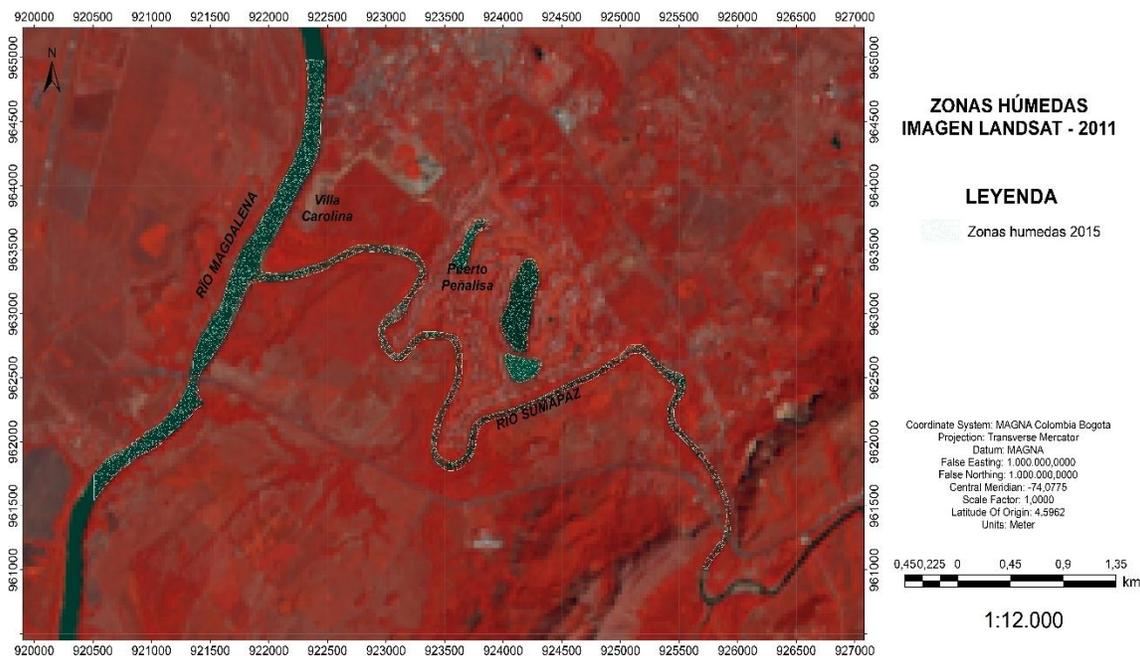


Figura 48. Imagen Landsat año 2015. Fuente: Imágenes procesadas y adaptadas; Software ERDAS, Arcgis 10.2.

Las ilustraciones anteriormente expuestas fueron procesadas de tal manera que muestran las variaciones en los índices de humedad en la zona de estudio; el análisis de estas variaciones en la humedad indica cuales son las zonas que mantienen más humedad en sus suelos, y por lo tanto facilitan las acumulaciones de agua permitiendo fenómenos de inundación, zonas más secas pueden absorber más agua y evitar estas acumulaciones, al permitir el movimiento de las aguas desde la superficie hacia el subsuelo.

En las imágenes procesadas, se observa que las zonas con mayor humedad (polígonos achurados en tonos azules) permanecen constantes, es decir, las zonas con susceptibilidad a inundarse son las mismas a través del tiempo. Como es de esperarse, estas zonas están ubicadas cerca de las márgenes de los ríos y se presenta una zona con humedad muy alta que se encuentra ubicada al norte de la desembocadura del Río Sumapaz. Esta zona está compuesta por sedimentos finos de origen fluvial, y ha estado muy influenciada por la dinámica fluvial del río, lo que la hace un área muy propensa a saturarse de agua y a facilitar las inundaciones en temporadas de altas precipitaciones.

En la zona suroriental, donde están los lagos, se observan remanentes de los paleomeandros generados por la dinámica fluvial del Río Sumapaz, y estos evidencian que este río ha variado permanentemente su cauce a través del tiempo, por lo que es conveniente considerar métodos para mantener controlado el cauce del río o respetar su zona de amortiguación para evitar que genere inundaciones en zonas aledañas.

7. EVALUACIÓN AMENAZA POR INUNDACIÓN

7.1. Metodología

Las inundaciones se presentan como resultado de las crecientes en los cuerpos de agua, originadas por lluvias intensas o continuas. El flujo de las aguas sobrepasa la capacidad de retención del suelo y de los cauces produciendo desbordamientos e inundando las zonas contiguas a los cursos de agua.

Las inundaciones se pueden dividir en inundaciones pluviales, inundaciones fluviales lentas, inundaciones fluviales rápidas o torrenciales, inundaciones por acciones del mar, e inundaciones debidas al manejo inadecuado de estructuras hidráulicas o, a fallas en las mismas. A su vez, la acción antrópica en las cuencas de los ríos también influye en la ocurrencia de las inundaciones, ya sea por la intervención del cauce o por la ocupación de los terrenos aledaños al cauce, entre otras (Universidad de los Andes – Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006)

Para delimitar estas áreas se debe identificar las posibles fuentes de la inundación en el territorio que pueden ser por desbordamiento de ríos, ascenso del mar, ruptura de obras de infraestructura hidráulica y pluvial. La delimitación de áreas susceptibles a inundación por desbordamiento de ríos se realiza mediante el análisis de la dinámica fluvial, para ello se identificarán y clasificarán las diferentes geoformas de acuerdo con su relevancia en la dinámica actual.

La metodología utilizada en el presente estudio hace relación a la evaluación de características propias del terreno asociadas a procesos de dinámica fluvial; tales como unidades geomorfológicas relacionadas con ambientes fluviales, depósitos geológicos recientes y de características específicas que involucran la participación de ambientes acuáticos en su formación, áreas de pendientes muy bajas que podrían permitir la acumulación de agua ya sea por fuertes precipitaciones o por desborde lateral de cuerpos de agua. Los detonantes evaluados están relacionados con las precipitaciones máximas mensuales y máximas diarias principalmente.

7.2. Resultados

7.2.1. Escenarios de inundación

Con el fin de realizar el estudio de amenaza por inundaciones para la zona de estudio, se construyeron diferentes escenarios hipotéticos con los modelos digitales del terreno seleccionado, a partir del modelo de elevación digital (DEM) obtenido por estudios específicos de la zona, se aprecian las siguientes características:

- Relieve a partir de la cota base del río Sumapaz de 260 m.

- Niveles de inundación con intervalos de 2 metros hasta 16m
- Infraestructura actual en la zona.

A partir de un modelo DEM se elaboraron mapas de inundaciones, donde se relacionan las variables: altura y topografía, cada dos metros se proyecta un nivel de inundación hipotético en cada escenario, se tienen en cuenta aspectos tan importantes como: morfología del relieve inundado, todo esto con el fin de obtener mapas de cotas de inundación hasta 16 metros.

El resultado se muestra en los siguientes mapas, donde se aprecian las variaciones topográficas, y su comportamiento a medida que los niveles de los ríos Magdalena y Sumapaz ascienden a intervalos de 2 metros llegando a los diferentes niveles de inundaciones hasta la terraza superior.

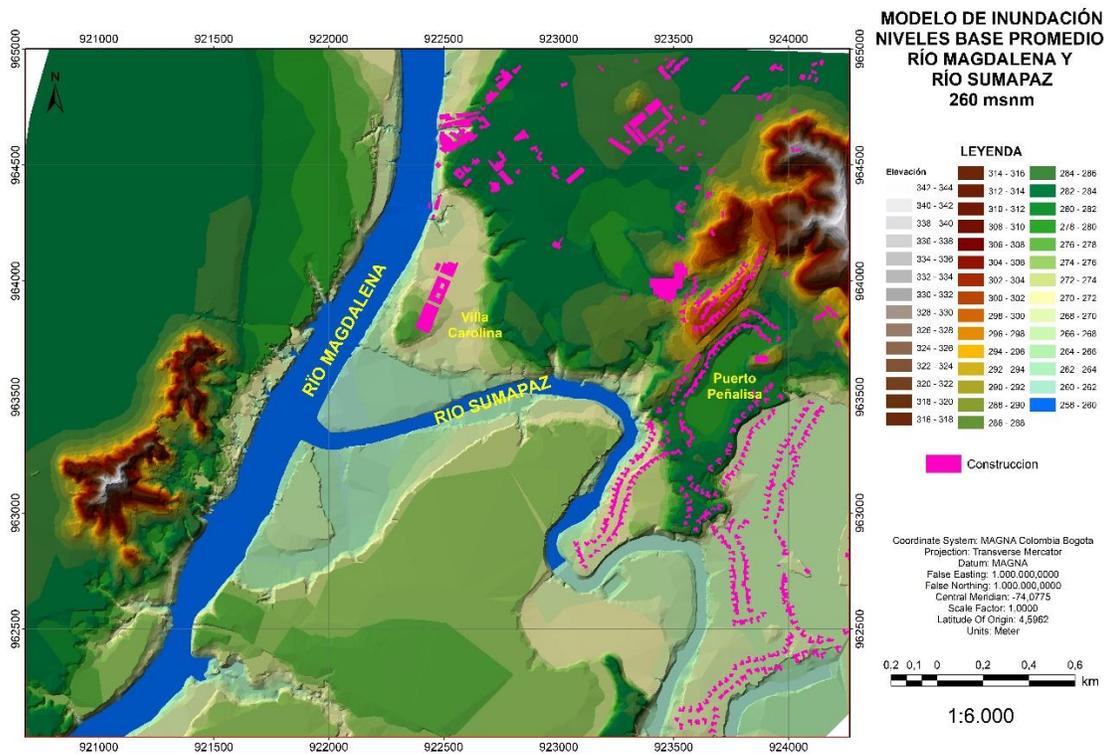


Figura 49. Modelo de inundación zona de estudio, niveles base promedio Ríos Magdalena y Sumapaz. Fuente propia.

En la Figura 49 se observa el nivel base de inundación a la cota de 260 m, de los ríos Magdalena y Sumapaz. Este nivel no genera amenaza alguna, ya que todos los asentamientos y construcciones se encuentran por encima de este nivel del río y a una distancia segura.

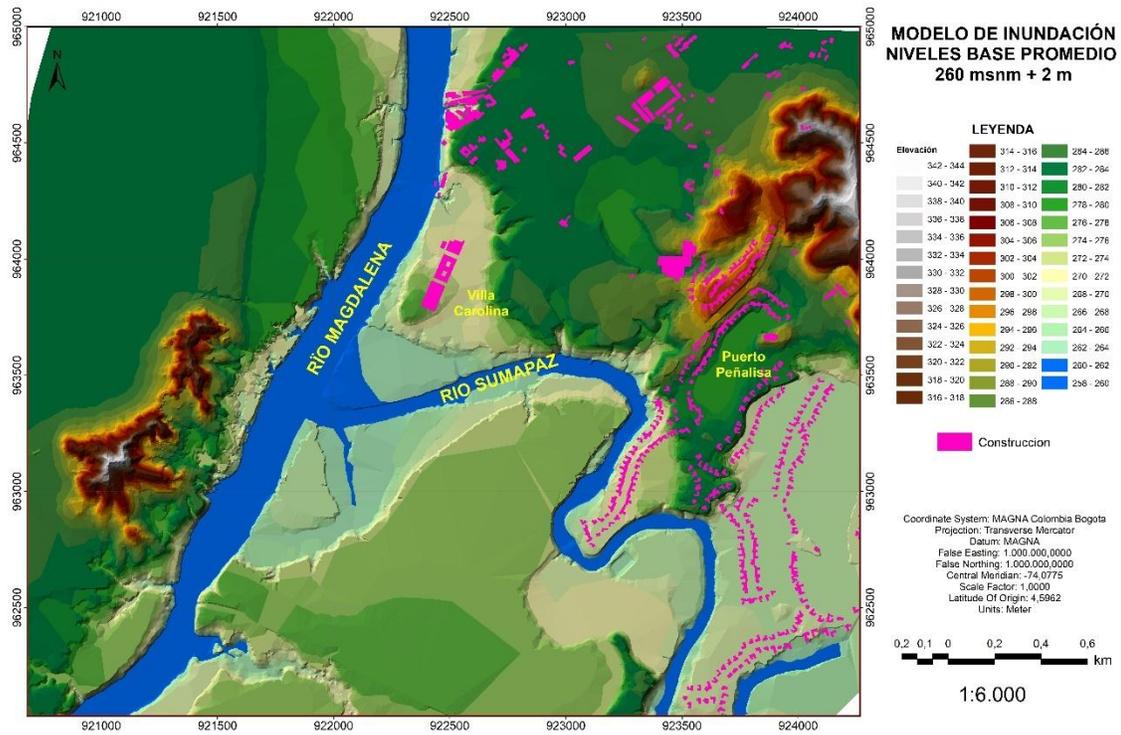


Figura 50. Modelo de inundación zona de estudio, niveles base promedio Ríos Magdalena y Sumapaz, nivel +2 metros. Fuente propia.

En la Figura 50 se observa un aumento en el nivel de los ríos Magdalena y Sumapaz en 2 metros desde la cota base, lo que conlleva la inundación de una primera terraza ubicada cerca al cauce del río, estas zonas se encuentran ubicadas lejos de las zonas de vivienda y aun no representan una seria amenaza para la población o la infraestructura.

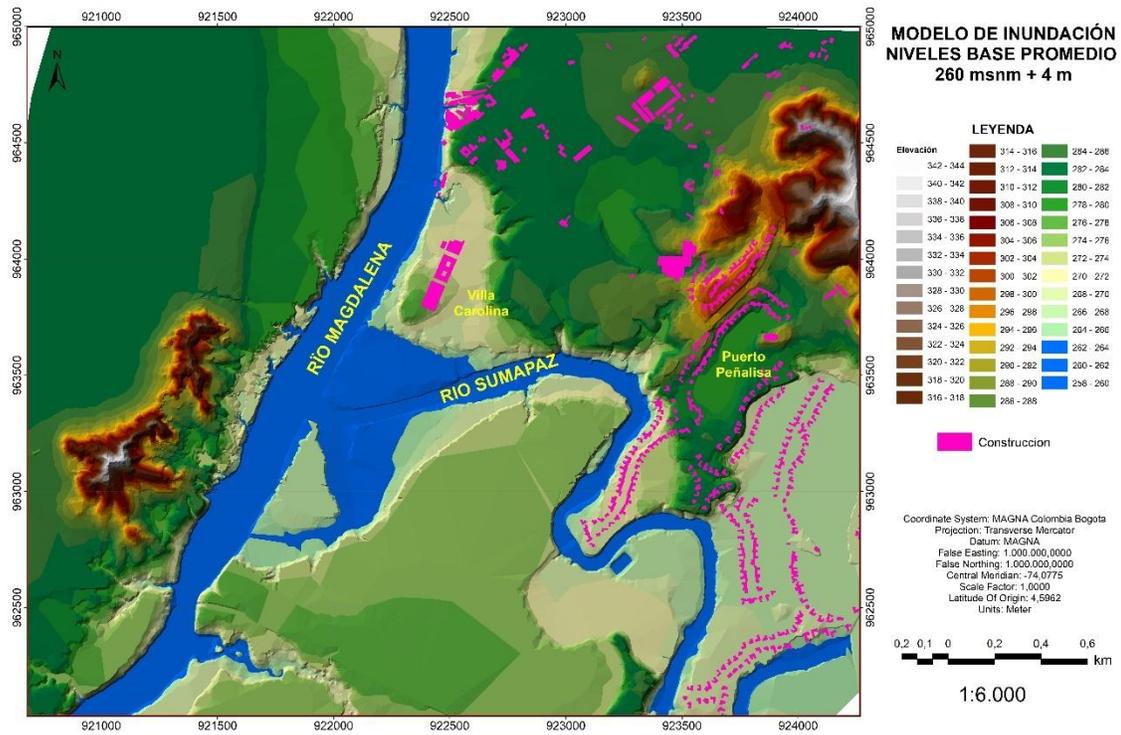


Figura 51. Modelo de inundación zona de estudio, niveles base promedio Ríos Magdalena y Sumapaz, nivel +4 metros. Fuente propia.

En la Figura 51 se observa una inundación en un área mucho mayor, debido al incremento del nivel promedio de los ríos en 4 metros, esta segunda terraza es mucho más extensa y lleva los niveles del agua cerca de las zonas de vivienda, pero a pesar de esta cercanía, estos niveles no representan una amenaza ya que las viviendas se encuentran ubicadas en terrazas más altas que la que se encuentra inundada en este escenario.

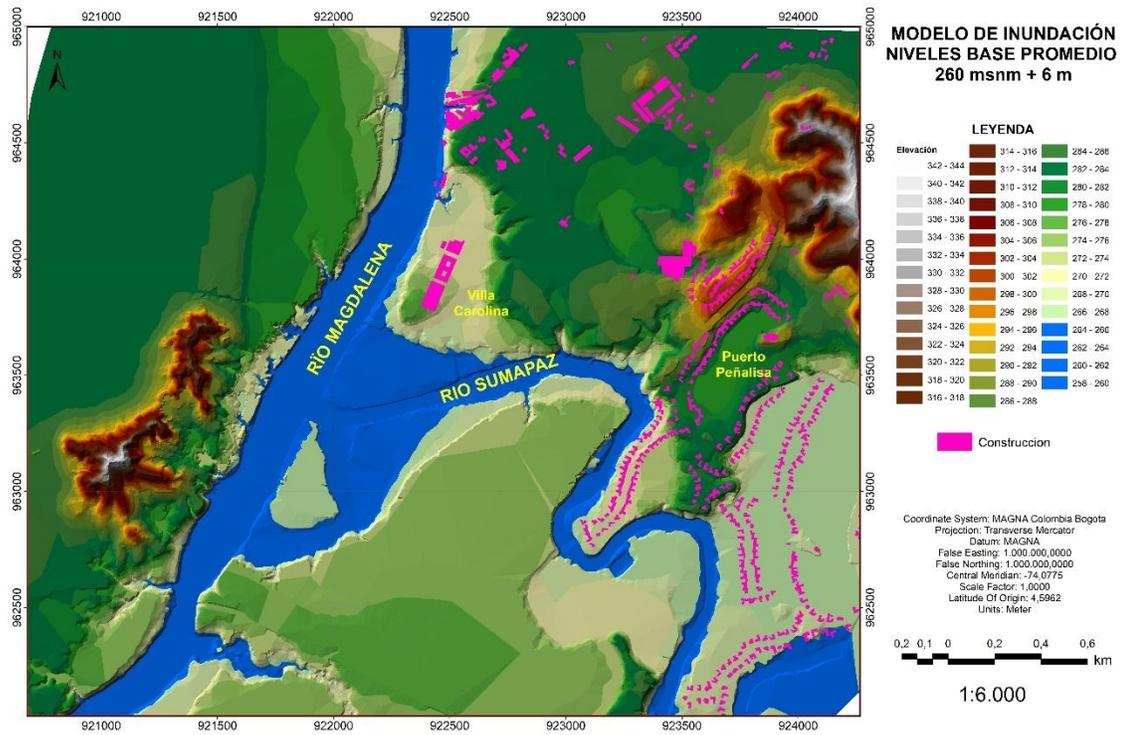


Figura 52. Modelo de inundación zona de estudio, niveles base promedio Ríos Magdalena y Sumapaz, nivel +6 metros. Fuente propia.

En la Figura 52 se aprecia un escenario donde el nivel de los ríos Magdalena y Sumapaz ha subido cerca de 6 metros por encima de su nivel promedio, inundando un tercer nivel de terrazas, este tercer nivel es muy poco extenso ya que se caracteriza por tener una pendiente muy empinada, debido a esto los niveles del agua no ganan mucho terreno de forma horizontalmente, manteniéndose a salvo las viviendas.

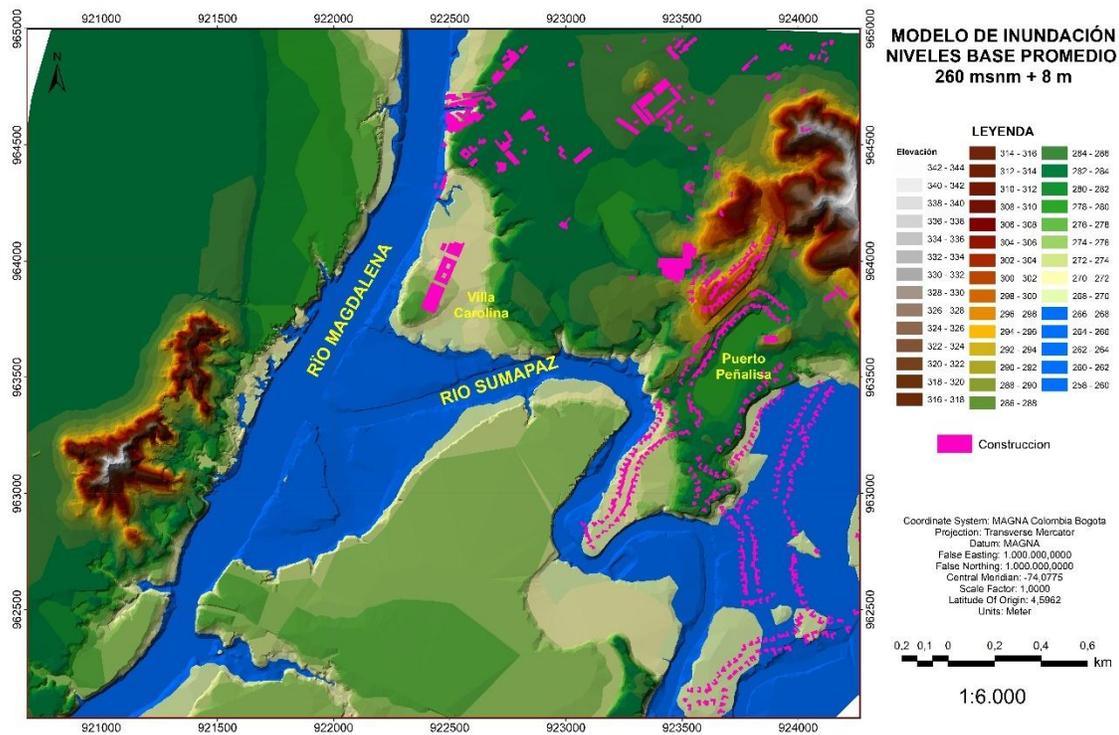


Figura 53. Modelo de inundación zona de estudio, niveles base promedio Ríos Magdalena y Sumapaz, nivel +8 metros. Fuente propia.

En la Figura 53 se observa un escenario donde las aguas de los ríos Magdalena y Sumapaz han aumentado 8 metros desde su nivel promedio, a este nivel las aguas han inundado otra terraza de poca extensión pero con una pendiente alta, por lo cual las viviendas no corren riesgo de ser inundadas todavía en sector de Villa Adriana, puesto que las viviendas se encuentran en un alto topográfico respecto a los niveles que alcanza el Río Magdalena en condiciones normales, pero en el sector de Puerto Peñalisa el 42% de las viviendas se encuentran afectadas.

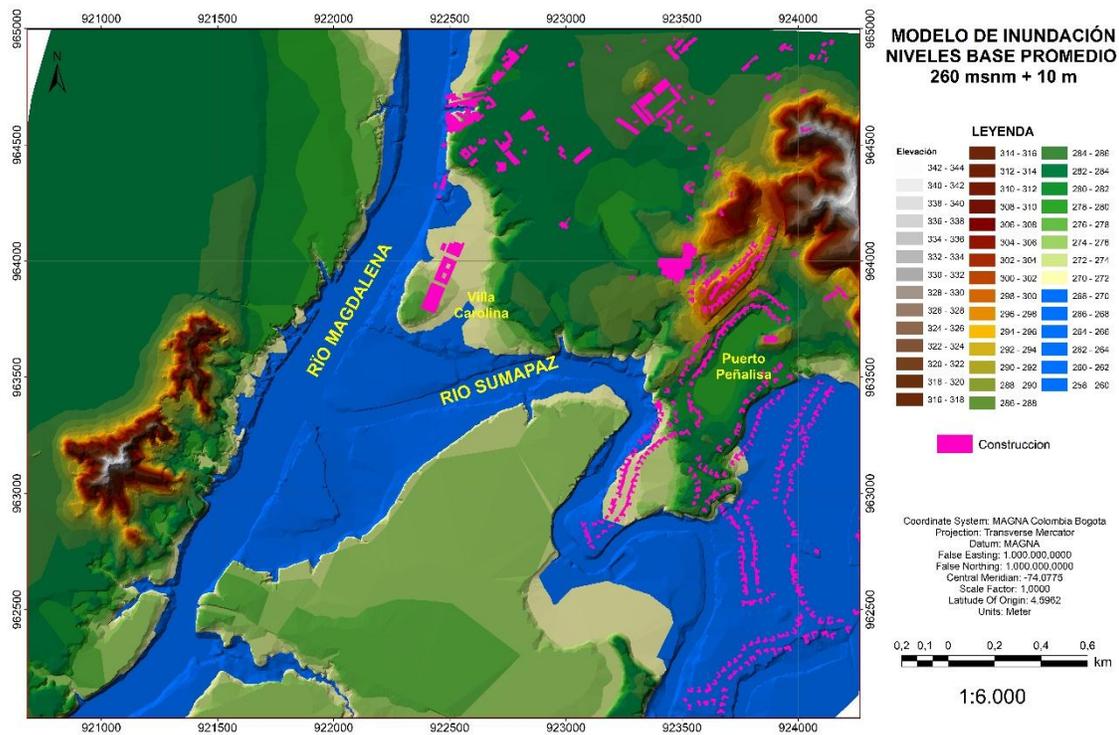


Figura 54. Modelo de inundación zona de estudio, niveles base promedio Ríos Magdalena y Sumapaz, nivel +10 metros. Fuente propia.

En la Figura 54 se observa un escenario donde las aguas de los ríos Magdalena y Sumapaz han alcanzado sus niveles máximos registrados en su historia que es un nivel de 12,50 metros desde su base como lo muestran los datos del IDEAM, lo que son 10 metros por encima de su nivel promedio actual, en este escenario las viviendas ubicadas en la parte más baja del alto topográfico serian inundadas ya que la terraza actual es menos empinada y abarca más territorio, dando como resultado la inundación de un territorio mayor a la que se venía presentando.

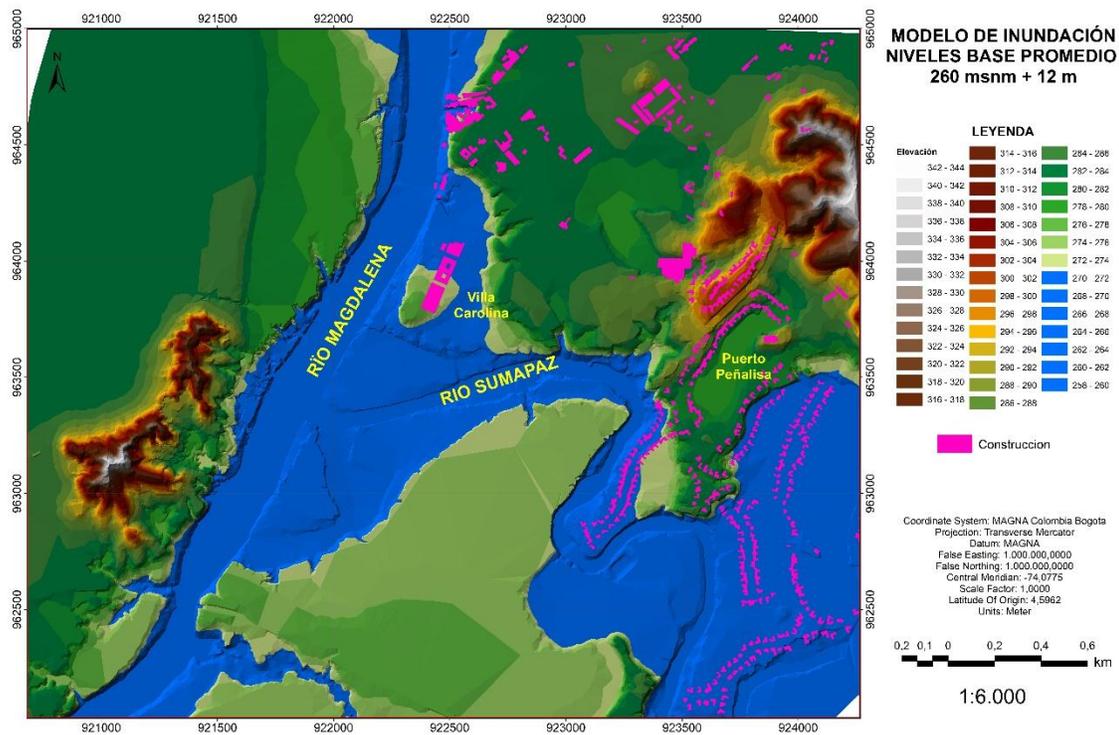


Figura 55. Modelo de inundación zona de estudio, niveles base promedio Ríos Magdalena y Sumapaz, nivel +12 metros. Fuente propia.

En la Figura 55 se observa un escenario donde las aguas de los ríos Magdalena y Sumapaz han ascendido 12 metros desde su nivel promedio actual, es decir una profundidad total de 14 metros, en este escenario la mitad de las viviendas se encuentran inundadas en el sector de Villa Carolina, una parte hacia el norte y otra hacia el sur, quedando expuestas solamente las viviendas que se encuentran en una topografía más alta, el río Sumapaz inunda el 63% de su terraza principal, cabe resaltar que según los datos recopilados del IDEAM un escenario así, no se ha presentado aún, y sería meramente hipotético.

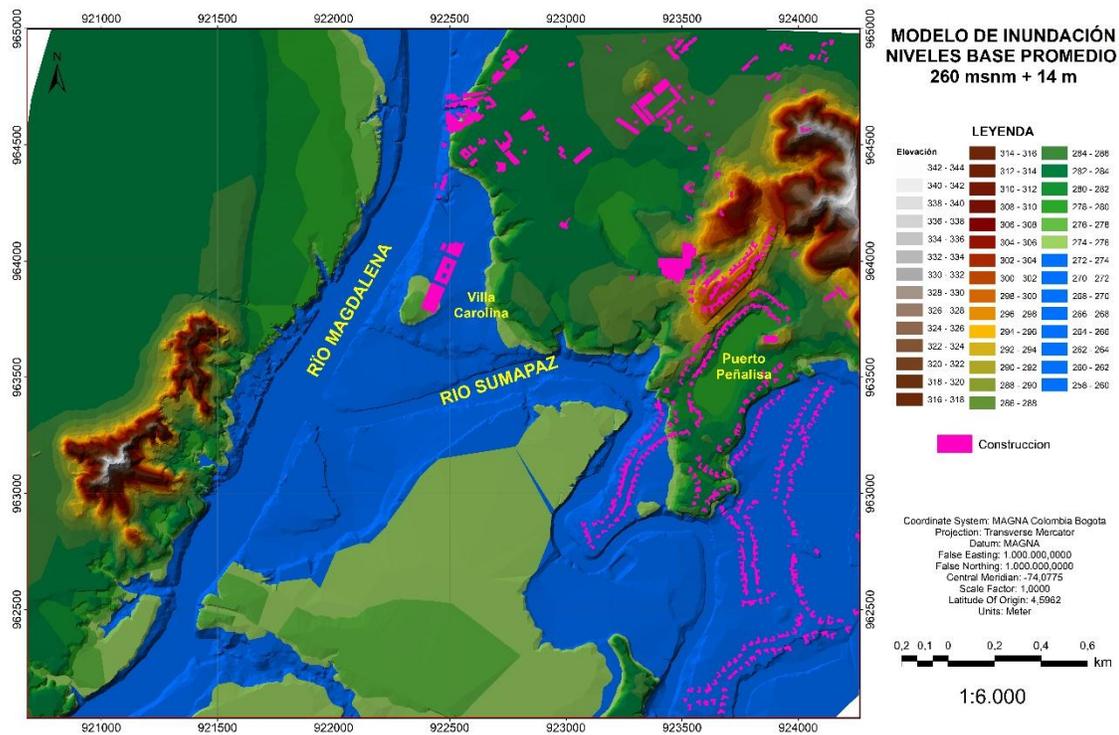


Figura 56. Modelo de inundación zona de estudio, niveles base promedio Ríos Magdalena y Sumapaz, nivel +14 metros. Fuente propia.

En la Figura 56 se presenta un escenario donde los niveles de los Ríos Magdalena y Sumapaz han ascendido 14 metros desde su nivel promedio actual, en la imagen se puede observar que en este caso más de la mitad de las viviendas han sido inundadas, la mayoría de viviendas son las que se encuentran en el sector Norte, quedando una pequeña cantidad de viviendas dentro de un islote rodeado por las aguas del Río Magdalena, en este caso la profundidad total del río sería cercana a los 16 metros desde la superficie hasta la base, el río Sumapaz por el contrario inunda la terraza principal, con una afectación del 72%.

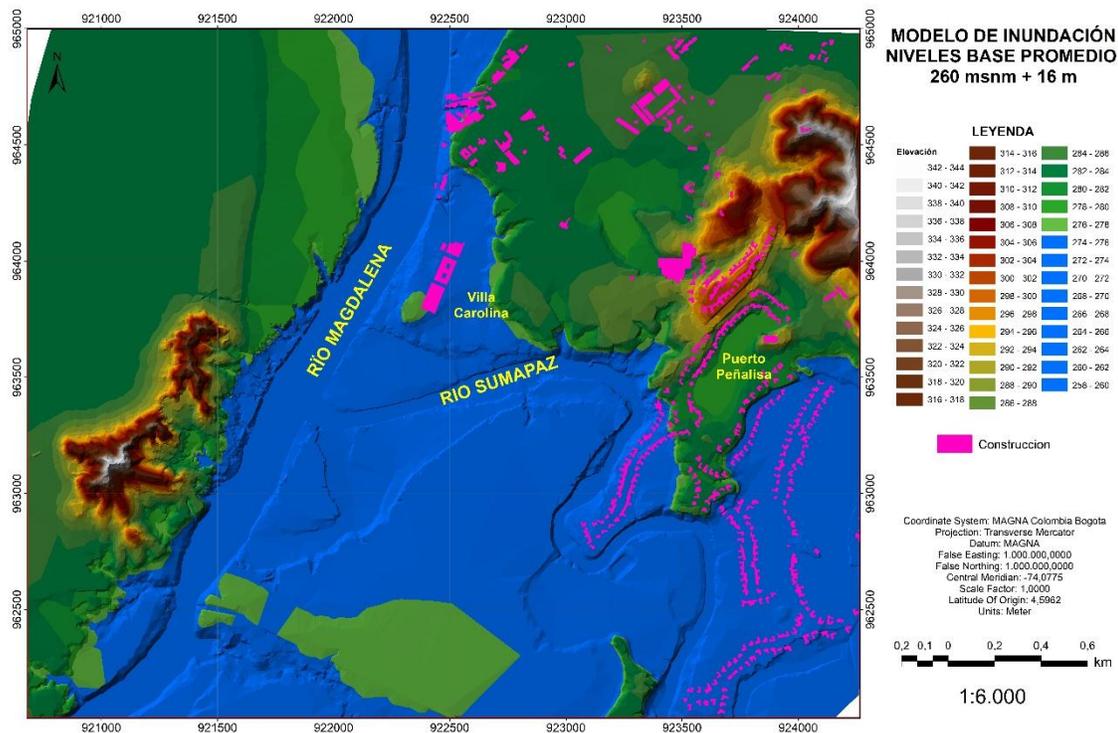


Figura 57. Modelo de inundación zona de estudio, niveles base promedio Ríos Magdalena y Sumapaz, nivel +16 metros. Fuente propia.

En la Figura 57 se observa un escenario donde los cauces de los ríos Magdalena y Sumapaz han aumentado en más de 16 metros desde su nivel promedio actual, en este caso cerca del 90% de las viviendas serían inundadas, y las restantes estarían bajo grave riesgo de ser inundadas si los niveles de los ríos Magdalena y Sumapaz siguen aumentando.

Finalmente, se puede proyectar un escenario más catastrófico, donde todas las viviendas de la zona de estudio serían inundadas, la profundidad del río sería cercana a los 20 metros, es decir 17,18 y 19 metros por encima del nivel promedio actual, la inundación del nivel más alto de terraza en el valle aluvial del río Sumapaz, que repercute tanto en la zona de estudio como aguas arriba de los cauces principales, factor no evaluado en este estudio, como tal se puede presentar un desastre natural asociado al rompimiento de las represas Quimbo, Prado y/o Betania.

Por otro lado, la zona más afectada sería en donde se encuentra ubicada la urbanización Villa Carolina, debido a que esta zona ha tenido bastante influencia fluvial a través del tiempo, no se tienen registros de inundación a tal escala, por lo cual este escenario sería hipotético.

Con los datos extraídos de los puntos tomados en la zona de estudio, y generando escenarios de subidas del nivel del río, se puede generar un modelo que presenta las zonas inundables con respecto al aumento del nivel del río Magdalena, con esta información se pueden tomar

decisiones para prevenir y/o mitigar condiciones que pongan en riesgo a la población, como, por ejemplo: la construcción de diques o jarillones, que contengan el avance del agua hacia zonas anegadizas.

Como evidencia que corrobora este modelo, se tienen niveles de inundación marcadas en las casas y edificaciones que han sido afectadas en el pasado



Fotografía 27. Registro de las alturas alcanzadas por el nivel del agua durante las inundaciones en 2008 y 2011 respectivamente, marcadas por una línea azul.

En la Fotografía 27 se observa los niveles alcanzados por el Río Magdalena marcados con una línea azul, la línea superior muestra el tope de la inundación en el mes de noviembre del año 2008, la línea inferior muestra el tope de la inundación el mes de agosto del año 2011, esta foto fue tomada en cercanías al malecón, en esa oportunidad el Río Magdalena subió por encima de unos 8 metros de su nivel promedio actual.

7.2.2. Mapa de amenaza por inundación

Como resultado principal de este trabajo se genera un mapa que representa la potencial amenaza por inundación en la zona, clasificando el grado de amenaza en tres categorías: Alta, Media y Baja.

Las zonas con grado bajo de amenaza por inundación se encuentran en regiones con topografías altas y donde existe un buen drenaje que impide la acumulación de las aguas, lo

cual evita la generación de inundaciones. Estas zonas se encuentran hacia el oriente, sur y noroccidente del área de estudio y abarcan cerca de un 62 % de la misma.

Las zonas con grado medio de amenaza se localizan hacia las regiones con pendientes bajas pero que no tienen un buen sistema de drenaje para evacuar las aguas acumuladas en situaciones de precipitación extremas. Esta zona se localiza sobre todo en franjas cerca de las terrazas bajas, abarca cerca de un 15% del área total.

Las zonas con grado alto de amenaza se encuentran en las márgenes de los cauces de los ríos Magdalena y Sumapaz y generan un mayor grado de amenaza. Estas regiones se ubican por todo el borde del río en forma de ronda y abarcan cerca del 23% de la zona de estudio.

El mapa de amenaza por inundaciones clasifica por medio de colores las diferentes regiones de la zona de estudio, representando los grados de amenaza categorizada en baja, media y alta (Tabla 18. Clasificación de amenaza por inundaciones.).

Tabla 18. Clasificación de amenaza por inundaciones.

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN
AMENAZA BAJA	Zonas localizadas por encima de los 272 m.s.n.m definida por el periodo de retorno del nivel de 500 años, donde concurren las unidades geomorfológicas del ambiente fluvial correspondientes a terrazas antiguas y unidades geológicas de tipo terraza antigua.
AMENAZA MEDIA	Zonas localizadas entre 268 y 272 m.s.n.m definidas por los periodos de retorno de 10 y 500 años, donde concurren las unidades geomorfológicas del ambiente fluvial correspondientes a terrazas subrecientes y unidades geológicas de tipo terrazas recientes altas.
AMENAZA ALTA	Zonas localizadas por debajo de los 268 m.s.n.m definidas por un periodo de retorno del nivel de 10 años, donde concurren las unidades geomorfológicas de tipo terraza de acumulación y unidades geológicas de tipo terraza baja.

En el mapa de la Figura 58 se presentan 3 rangos de clasificación para la amenaza por inundación. Estos rangos por amenaza son: Alta, Media y Baja. El rango de amenaza alta se presenta en zonas de bajas pendientes y cercanas al cauce de los ríos Magdalena y Sumapaz; las zonas de amenaza media se encuentran después del primer escarpe de terraza de inundación, es decir, a una altura más elevada con respecto a la primera terraza de inundación. En esta zona se encuentra el barrio Villa Carolina, Puerto Peñalisa y San Martín. Finalmente,

el rango de amenaza baja se encuentra a una distancia más alejada de los afluentes y a una mayor elevación, la cual no es sobrepasada incluso en las épocas de lluvias.

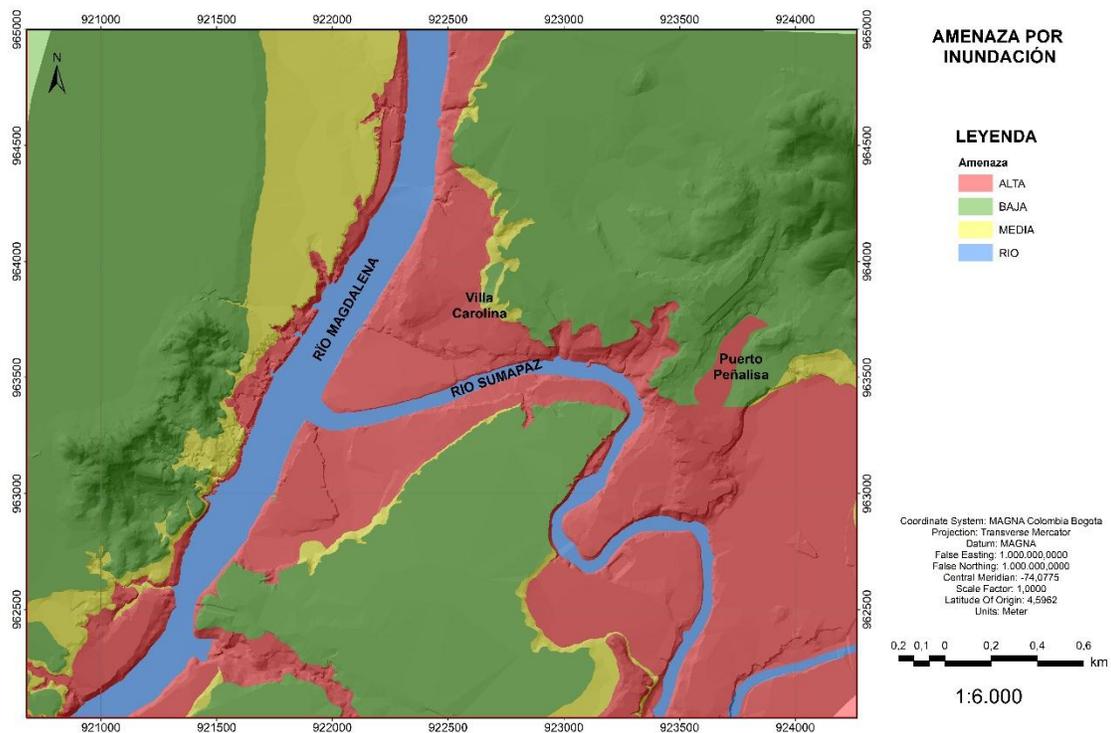


Figura 58. Zonificación de amenaza para el área de estudio. Fuente propia.

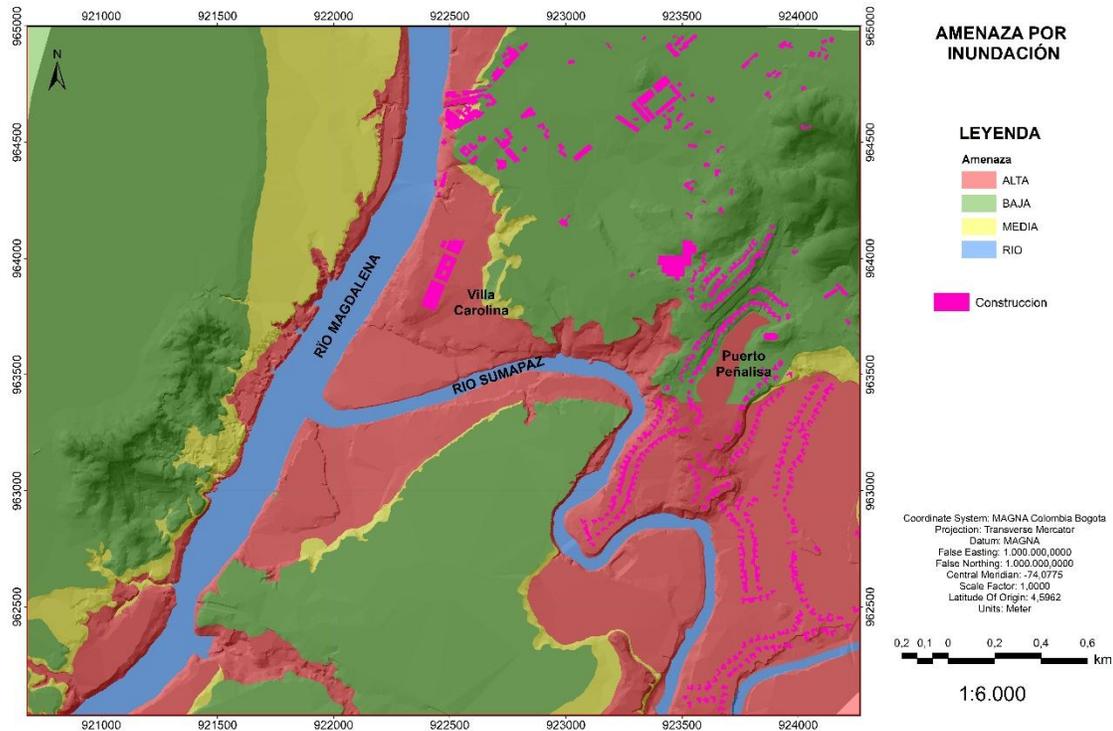


Figura 59. Zonificación de amenaza por inundación con infraestructura 2015. Fuente propia.

El mapa en la Figura 59 se muestra los 3 rangos de amenaza para la infraestructura, clasificados por amenaza de tipo Alta, Media y Baja. La zona de amenaza Alta representa edificaciones habitadas, redes de servicios públicos y vías que se encuentran en regiones de topografía baja; las zonas de amenaza media representan regiones ocupadas con construcciones habitadas, redes de servicios públicos y vías principales, todas ubicadas en superficies elevadas; finalmente las zonas de amenaza baja se presentan en terrenos habitados solamente en un 24% y ubicados en una topografía alta.

❖ Verificación de la metodología planteada.

La metodología utilizada para la evaluación de amenaza por inundaciones debe ser puesta a validación; debido a que la cantidad de datos hidrológicos y meteorológicos obtenidos de la consulta bibliográfica y de las bases de datos del IDEAM es bastante baja para la realización de evaluaciones matemáticas que permitan relacionar modelos hidrológicos e hidráulicos de gran detalle.

En los ríos, al ser parte del medio natural y a diferencia de lo que puede ocurrir en los canales o en otras obras hidráulicas, se producen una serie de interrelaciones entre los numerosos factores del medio, que motivan el hecho de que no todas las preguntas (¿cuánta agua?, ¿cuándo la transporta?, ¿por dónde?) se puedan responder únicamente con la hidrología y la hidráulica en lámina libre.

Se pueden enumerar las siguientes diferencias básicas entre un río y la obra hidráulica más similar, aunque sólo en apariencia, que podría ser un canal:

- **El caudal:** En un canal suele ser sensiblemente constante y se corresponde con el de diseño. En un río el caudal siempre es variable y depende del régimen hidrológico de la cuenca de aportación. De hecho, esa variación y especialmente la ocurrencia de eventos extraordinarios, como las avenidas, tienen una gran influencia en la dinámica fluvial.
- **El trazado en planta:** El trazado de un canal es fijo, sin embargo, el trazado de los ríos normalmente es cambiante, de manera aguda tras determinados eventos extraordinarios, o de manera gradual a lo largo del tiempo. El trazado de los canales suele ser una sucesión de alineaciones rectilíneas, mientras que el trazado del río es siempre sinuoso, buscando el acomodo o equilibrio en su entorno geomorfológico.
- **El contorno:** El contorno de los canales es fijo, normalmente se reviste su sección para que esta no experimente variaciones. El contorno o sección de un río varía a lo largo del tiempo en función de la combinación de: variables hidrológicas (caudal líquido), hidráulicas (fundamentalmente la velocidad del flujo) y del transporte de material (caudal sólido y granulometría de este). La combinación de estas variables provoca acreciones por depósito de material, o regresiones por arrastre (erosión) del material que forman el fondo y los taludes.
- **El material transportado:** En el caso de los canales el flujo está formado únicamente por agua, mientras que en los ríos el flujo consta de una fase líquida (caudal líquido) y de una fase sólida (caudal sólido).
- **La interacción con el ecosistema:** A diferencia de los canales los ríos interactúan con el ecosistema en el que se desarrollan: a través del nivel freático mantienen las condiciones de humedad idóneas en las riberas que permiten el desarrollo de sotos y bosques fluviales. Por otra parte, las condiciones de calado y velocidad del agua (ambas menores que las que suelen darse en canales) permiten el desarrollo de comunidades vegetales y animales.

Debido a la periódica variación del caudal en un mismo río suelen existir cauces de diferentes dimensiones (menor, mayor y extraordinario), cada uno de ellos es modelado por corrientes con diferente caudal. Las variaciones de caudal definen el régimen hidrológico de un río. Las

variaciones temporales se dan durante o después de las tormentas. En casos extremos se puede producir la crecida cuando el aporte de agua es mayor que la capacidad del río para evacuarla, desbordándose y cubriendo las zonas llanas próximas.

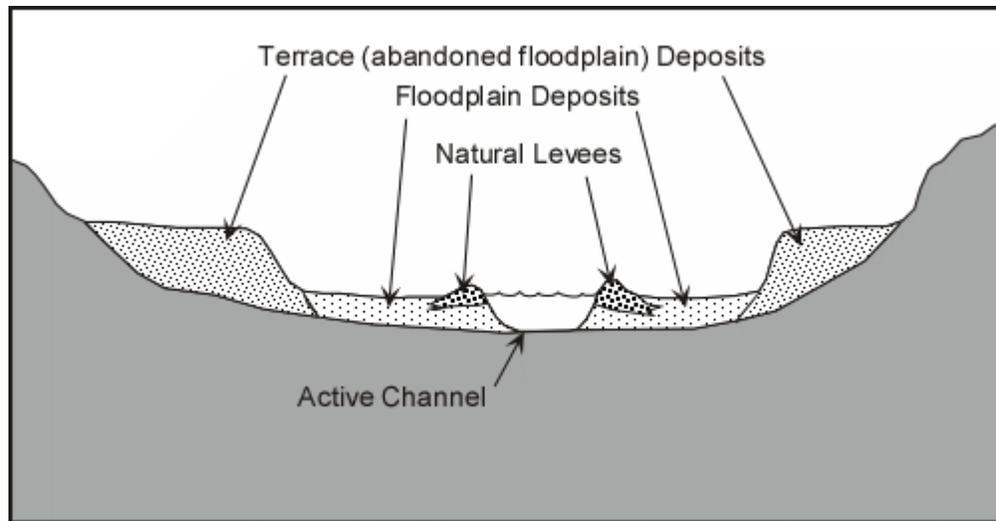


Figura 60. Esquema de una sección transversal generalizada de un río. Tomado de Nelson 2016, Tulane University.

El canal es la incisión más profunda del río, la última en ser abandonada por las aguas cuando el río se seca. Tiene forma de arqueta y es la zona donde las aguas corren con mayor velocidad, por lo que suele tener elementos más grandes que las orillas.

El lecho menor es el que cubren las aguas entre las épocas de caudal intermedio. Sus márgenes están claramente definidas. En él puede existir una alternancia de fondos hundidos y elevados. Los fondos hundidos pueden formar pozas, si están cerrados, o surcos si se extienden longitudinalmente. Los fondos altos forman umbrales, y llegan a hacer una ruptura de pendiente en el que se forma un rápido. Algunos fondos altos están emergidos y forma islas fluviales.

El lecho mayor es el que cubren las aguas durante las épocas de máximo caudal anual. Esta zona se inunda todos los años, pero durante unas pocas semanas. Aquí predominan los procesos de acumulación, y los de erosión. Esta acumulación se hace, mayoritariamente, cerca de los márgenes del lecho menor, hasta el punto de que en algunos sitios puede presentar un perfil alomado, y tener cierta contrapendiente con relación al resto del lecho del río. Estas contrapendientes pueden aislar pequeñas depresiones longitudinales que se inundan durante las crecidas, antes que por la arroyada del agua, por infiltración. Sus márgenes son conocidos e identificables, pero están mucho más desdibujados que los del lecho menor.

El lecho mayor esporádico es aquella zona que se inunda en las grandes crecidas, las cuales se dan recurrentemente, pero con ciclos de varios años entre una y otra, y en son ocasiones seculares. Esta zona está colonizada por la vegetación, incluso suele estar cultivada. En

muchos países, imprudentemente, se están construyendo viviendas dentro de los márgenes de estos lechos, por lo que suelen sobrevenir inundaciones y catástrofes que afectan a las personas, las vías de comunicación y la economía. Sus márgenes están muy difuminados, aunque en condiciones naturales es posible determinarlos. Sin embargo, es necesario un estudio, ya que normalmente no se distingue de los alrededores. Cuando los ciclos de inundación son muy largos no tienen competencia suficiente para marcar el lecho, y, además, otros procesos morfogenéticos borran sus huellas.

Para el presente estudio se hicieron reconocimientos de cada una de las geometrías expuestas anteriormente para los ríos que tienen influencia directa en los procesos de inundación en el municipio.



Fotografía 28. Terraza de Inundación, donde se observan 3 niveles de terrazas teniendo en cuenta los cambios de granulometría de cada depósito desarrollado por acción del río Sumapaz en el sitio El Paso, Municipio de Ricaurte.

Para el río Sumapaz se presentan la Fotografía 28 y Fotografía 29 en las cuales se puede observar los diferentes niveles de inundación que puede alcanzar el cauce debido a incrementos del caudal. La Fotografía 28 presenta el lecho menor, mayor y mayor extraordinario; estos están representados por nivel 1, nivel 2 y nivel 3 respectivamente, en la fotografía podemos observar como el nivel del río puede alcanzar una altura superior a los 6 metros; ya que cada nivel de terraza identificado tiene una altura promedio de 2 metros.



Fotografía 29. Terraza de Inundación río Sumapaz perteneciente al lecho mayor, sector San Martín, Municipio de Ricaurte, se observan zonas con construcciones civiles.

La Fotografía 29; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** representa el sector San Martín en el que se logra identificar un campo de entretenimiento asociado a fútbol y unas edificaciones adjuntas. Estas estructuras se encuentran construidas sobre el lecho mayor del río Sumapaz; área que está en zonificación de amenaza alta por inundación.

8. RECOMENDACIONES

Por medio del trabajo de campo se pudo constatar la presencia de asentamientos urbanos en zona de alta amenaza por inundaciones (Fotografía 30 y Fotografía 31). Las viviendas construidas en estas áreas de influencia hídrica suponen un enorme riesgo para sus propietarios.



Fotografía 30. Zona de asentamientos ilegales sobre la terraza de inundación. Sector San Martín.

Analizando los resultados obtenidos en cada fase del estudio, se determinó que es necesario adoptar medidas de prevención y mitigación en ciertas regiones donde se pueden presentar fenómenos de inundaciones.



Fotografía 31. Zona de asentamientos ilegales sobre la terraza de inundación. Sector San Martín.

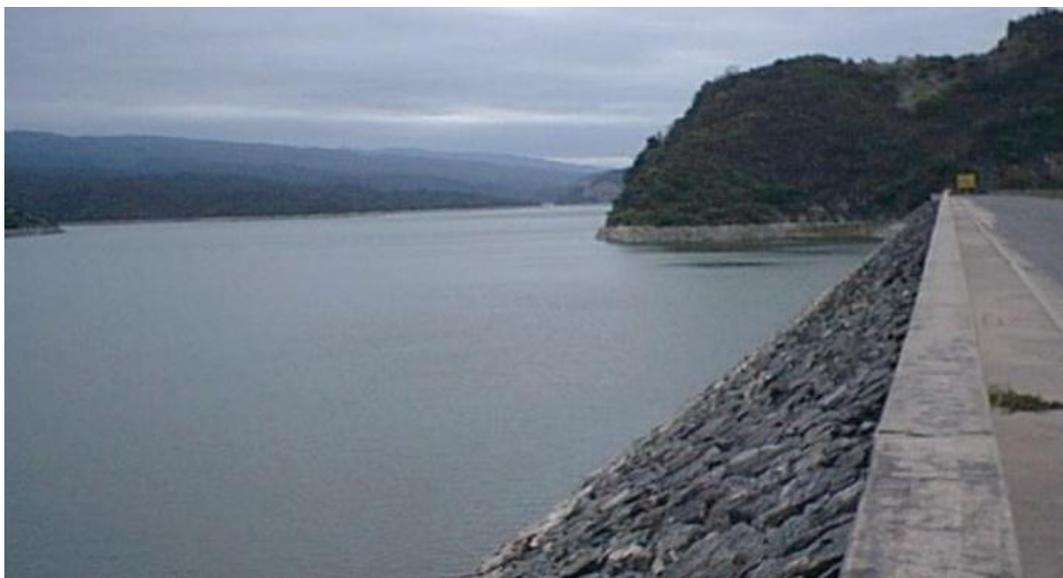
El principal método para prevenir las inundaciones consiste en el manejo, recuperación y ordenamiento ambiental de las cuencas hidrográficas, lo cual no solo constituye a la conservación de los recursos naturales y del agua, sino que además reduce la probabilidad de la ocurrencia de inundaciones; dentro de las medidas que pueden ser tomadas para prevenir y mitigar las inundaciones se encuentran:

- **Ampliación de cauces:** Esta medida permite mejorar las condiciones hidráulicas del cauce, bien sea por el retiro de los sedimentos mediante el dragado o por la rectificación de sus márgenes, se utiliza en áreas de desembocadura, de alta sedimentación o donde procesos antrópicos han alterado la sección del cauce con rellenos u obras de infraestructura (Fotografía 32).



Fotografía 32. Ampliación de cauce, Foto tomada de: <http://ingedeca.es>.

- **Diques:** Estas obras ayudan a controlar y contener las crecientes al incrementar la capacidad hidráulica del cauce mediante la ampliación de la sección del margen con una barrera de tierra, cumplen la función de contención de la creciete y también disminuyen el efecto erosivo de las corrientes de agua. Los diques pueden ser longitudinales o transversales. Los longitudinales o también llamados jarillones, son estructuras lineales construidas con rellenos de material del sitio, estos diques deben ser acompañados con obras de control de drenaje y filtración; los diques transversales son estructuras perpendiculares al cauce, pueden ser de madera, concreto o gaviones, estos diques protegen las márgenes de un cauce de la erosión y de las inundaciones (Fotografía 33).



Fotografía 33. Obra de un Dique para evitar inundaciones. Imagen tomada de: <https://www.catamarcaactual.com.ar>

- **Canalización:** La medida de canalización se usa principalmente en zonas urbanas como control de la dinámica de las corrientes o como sistemas de desviación del curso principal, para la evacuación eficiente en caso de caudales muy altos. Presta la función de proveer condiciones hidráulicas fijas para el tránsito de corrientes. Para la conformación del canal, se puede usar: concreto, gaviones y materiales geosintéticos (Fotografía 34).



Fotografía 34. Canalización de los ríos Amarillo y Fogótico en la ciudad de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México. Imagen tomada de: <https://www.researchgate.net>.

9. CONCLUSIONES

El uso y manejo de la Geomática permite el almacenamiento, procesamiento y análisis provenientes de imágenes satelitales, fotos y cartografía tanto topográfica como temática para la identificación de zonas fluviales y las dinámicas espaciales temporales de la desembocadura del río Sumapaz en el Río Magdalena.

Del análisis de la dinámica fluvial de los ríos Magdalena y Sumapaz se obtienen valiosas conclusiones:

Se obtuvo a partir de técnicas de fotointerpretación de sensores remotos, análisis hidráulicos y mediante procesos geomáticos, la caracterización geológica y morfodinámica del sistema fluvial Magdalena – Sumapaz, en la zona de confluencia.

Se obtuvo mapas de dinámica fluvial Multitemporal desde el año 1940 a la fecha actual, donde se determina las zonas de migración lateral del río Sumapaz, además la migración del canal con respecto al nivel base de erosión en el río Magdalena.

Se obtuvo mapas de inundación a partir de los DEM, generados para observar cambios de niveles de inundación para cotas con intervalos de 2 metros.

Se define que la morfología de terraza aluvial del margen izquierdo del río Magdalena, es más alta y competente con respecto a las terrazas del río Sumapaz, dado esto las terrazas del río Sumapaz se encuentran en un grado alto de amenaza por inundación.

La interpretación visual de imágenes de satélite Landsat ha demostrado ser una técnica útil para aplicaciones en el análisis de dinámicas fluviales.

La aplicación de los modelos y metodologías establecidos por el SGC (Servicio Geológico Colombiano), para determinar la amenaza por inundación, permiten definir los grados de amenaza asociados a los caudales y morfología del área en estudio, dicho esto se concluye que:

La amenaza alta por inundación está ligada proporcionalmente a las terrazas bajas en el sistema fluvial Magdalena –Sumapaz.

La amenaza baja por inundación se sitúa en lugares donde la morfología es alta, terrazas antiguas (tercer nivel).

DISCUSIÓN

La metodología con la que se elabora el mapa Geológico es aplicada a partir del mapa nacional de amenaza, (2017), con la cual se obtienen resultados veraces de contactos entre unidades estratigráficas, además de la diagramación estratigráfica al detalle, este producto específico solo se puede obtener trabajando en una escala relativamente baja, además este

levantamiento cartográfico esta relacionando directamente al trabajo de campo adicional en la ejecución de la toma de datos.

Dada esta herramienta se genera el mapa Geomorfológico, el cual es más compleja su ejecución, debido a que se tiene que poligonizar (diagramar), cada unidad geomorfológica asociando datos bibliográficos interrelacionados con características propias de la roca, morfologías del ambiente y así agrupar unidades Geológicas, con unidades Geomorfológicas sin ninguna disfuncionalidad entre sus características, como los son: (competencia, ambiente de depositación, textura, estructura, etc).

Aunque el análisis sedimentario está directamente relacionado con las unidades cartográficas generadas durante la investigación no se muestran datos específicos sobre texturas, granulometrías, disposición de clastos y demás características detalladas de los sedimentos; Por el contrario, se muestran los diferentes episodios de depositación para zonas específicas donde se encuentran unidades aluviales importantes asociadas a cambios morfodinámicos.

Uno de los aspectos más atractivos de esta investigación es la dinámica fluvial Multitemporal, donde se muestran las zonas de migración lateral del río en un lapso de tiempo, desde el año 1940 a la fecha actual, además la migración del canal con respecto al nivel base de erosión en el río Magdalena, se define que la morfología de terraza aluvial del margen izquierdo del río Magdalena, es más alta y competente con respecto a las terrazas del río Sumapaz, lo cual deja a la intemperie el control litológico en el borde occidental de su cauce.

Dados estos diagramas específicos de los cauces multitemporales se elabora sobre una imagen reciente de la zona de estudio, un multitemporal de cauces, el cual tiene como propósito mostrar una proyección de los cambios en los bordes del cauce en un lapso de tiempo dado, lo cual nos deja visualizar la capacidad del río para retomar antiguos paleocanales y construir nuevas rutas para su desembocadura.

La metodología utilizada para la evaluación de amenaza por inundaciones es de gran importancia ilustrativa y alto potencial hipotético, dado que cuando se generan los aumentos de caudal cada 2 metros, es perceptible para el lector la alta peligrosidad de la zona de investigación; Aunque debe ser puesta a validación; debido a que la cantidad de datos hidrológicos y meteorológicos obtenidos de la consulta bibliográfica y de las bases de datos del IDEAM es bastante baja para la realización de evaluaciones matemáticas que permitan relacionar modelos hidrológicos e hidráulicos de gran detalle.

En los ríos, al ser parte del medio natural y a diferencia de lo que puede ocurrir en los canales o en otras obras hidráulicas, se producen una serie de interrelaciones entre los numerosos factores del medio, que motivan el hecho de que no todas las preguntas (¿cuánta agua?, ¿cuándo la transporta?, ¿por dónde?) se puedan responder únicamente con la hidrología y la hidráulica en lámina libre.

El mapa de amenaza por inundaciones se elabora con los resultados de las unidades identificadas en los mapas Geológico, Geomorfológico, Pendientes, además se procesan para obtener como resultado una zonificación en el área de estudio, donde se aprecia una amenaza

baja, media y alta directamente proporcional a la disposición del terreno espacialmente o a su topografía,

Cabe reiterar que la metodología del SGC (SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO), nos instruye sobre el manejo de software ArcGIS, para generar mapas con calificativos cuantitativos y cualitativos, para esta investigación se emplean (calificativos cualitativos), dado su trabajo de campo y la falta de datos para agregarlos a los atributos específicos en el software, se generan modelos en los cuales se determinan zonas de afectación a las subidas de caudal.

Aunque existan limitantes para la elaboración de la investigación, se debe exaltar los productos resultantes al generar estos modelos cualitativos, que nos ayudan a delimitar zonas de afectación al cambio abrupto de los niveles de aumento de caudal.

BIBLIOGRAFÍA

- IDEAM – Cormagdalena. (2011). Estudio Ambiental de la cuenca Magdalena – Cauca y elementos para su ordenamiento territorial.
- Acevedo, L., Rincon, D., Lopez, J., & Ruiz, I. (25 de Marzo de 2011). *CUENCA RIO SUMAPAZ MELGAR TOLIMA*. Obtenido de <https://julianlopezivanruiz.blogia.com/2011/032501-cuenca-rio-sumapaz.php>
- Acosta, H., & Ramírez, R. (1985). Ideas acerca del origen del abanico de Ibagué, Tolima. *Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia Bogotá*.
- Aguirre, N., & Olivera, M. (1991). Evaluación ambiental de amenazas naturales en el departamento de Cundinamarca. En *Programa Naciones Unidas para el desarrollo, proyecto COL 88/009. Centro de atención y prevención de desastres*. (pág. 87). Bogotá: Gobernación de Cundinamarca.
- Boggs, S. j. (2006). *Principles of sedimentology and stratigraphy*. EE.UU: Pearson Prentice Hall .
- Brice, J. (1984). Planform properties of meandering rivers. En P. C. 83, *River meandering* (págs. 1-15). New York: Am. Soc. Civil Engs.
- Caceres, C., & Etayo, F. (1969b). *Memoria cuadrángulo L-10 Fusagasugá*. Bogotá: INGEOMINAS-Universidad Nacional de Colombia (informe inédito).

- Centre for Ecology & Hidrology. (2013). A Review of Applied Methods in Europe for Flood-Frequency Analysis in a Changing Environment. *European Cooperation in Science and Technology*.
- Colwell, R. N. (1952). Photographic interpretation for civil purposes. En A. S. Photogrammetry (Ed.), *Manual of Photogrammetry* (Second ed., págs. 535-602). Menasha, Wisconsin, Washington: George Banta Publishing Co.
- Cossio, U., Rodríguez, G., & Rodríguez, M. (1994). Mapa geológico de la plancha 283 Purificación, departamento del Tolima. Escala 1:100.000. Con memoria explicativa. INGEOMINAS, Santa Fe de Bogotá.
- Cuervo, P., Gaitan, M., & Roa, E. (1989). Cartografía y principales características estratigráficas del abanico de Lérica, departamento del Tolima. *Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá*.
- De Porta, J. (1965). Estratigrafía del Cretácico superior y Terciario en el extremo sur del Valle Medio del Magdalena. *Boletín Geológico* (19), 5-30.
- De Porta, J. (1966). Geología del extremo sur del Valle Medio del Magdalena entre Honda y Guataquí. *Boletín Geológico*, 22-23, 1-347.
- Einsle, G. (1992). *Sedimentary basins. Evolution, facies and sediment budget*. Berlin: Springer-Verlag.
- Font i Sagué, N. (1905). *Curs de geologia dinàmica i estratigràfica aplicada a Catalunya*. Barcelona: La Neotipia.
- González, F. A., & Bonilla, J. L. (2012). MEMORÍA GEOLÓGICA DE LA PLANCHA 196 RÍO GUACHIRÍA A ESCALA 1:100.000. *SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO*.
- Guevara, A. (2003). Morfología fluvial. *Curso de obras de control fluvial de Universidad del Cauca*.
- Hettner, A. (1892). Die Kordillere von Bogotá. *Peterm. Mitt., Erg.*, 22 (104), 1-131.
- IDEAM. (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- INGEOMINAS – IDEAM. (2009). *Anteproyecto Mapas nacionales de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa*. Bogotá: Convenio INGEOMINAS – IDEAM.
- INGEOMINAS. (1992). Estudio Geológico - Geotécnico y aptitud urbanística de la ciudad de Ibagué. En *Informe 2153* (pág. 78). Ibagué: Convenio INGEOMINAS - Gobernación del Tolima.
- INGEOMINAS. (1995). Exploración del recurso hídrico subterráneo en el sur del Departamento del Tolima. En *Informe 2272*. Ibagué: Convenio con CORTOLIMA.

- INGEOMINAS. (1997). Evaluación hidrogeológica del abanico de Ibagué. En *Informe 2281*. Ibagué: Convenio con CORTOLIMA.
- INGEOMINAS. (2002). GEOLOGÍA DE LA PLANCHA 245 GIRARDOT. MEMORIA EXPLICATIVA.
- INGEOMINAS. (2007). *Atlas Geológico de Colombia. Escala 1:500.000. 26 planchas*. Bogotá.
- INGEOMINAS. (2009). *Zonificación de Amenazas por Movimientos en Masa en la Cuenca del Río Combeima. Ibagué – Tolima. Escala 1:25.000*. Bogotá.
- Leopold, B., Wolman, B., & Miller, J. (1995). Fluvial Processes in Geomorphology.
- Miall, A. (1977). A review of the braided-river depositional environment. *Earth Science Review*(13), 1-62.
- Miall, A. (2006). *The Geology of Fluvial Deposits. Sedimentary Facies, Basin Analysis, and Petroleum Geology*. Toronto: Springer Berlin Heidelberg.
- Miall, A. D. (2000). *Principles of sedimentary*. Toronto: Springer Berlin Heidelberg.
- Nilsen, T. H., & Moore, T. E. (1984). *Bibliography of alluvial-fan deposits*. Norwick: Geo Books.
- Olaya, A., Dimaté, C., & Robertson, K. (2010). ¿Fallamiento activo en la Cordillera Oriental al suroeste de Bogotá, Colombia? *Geología Colombiana*, 35, 58-73.
- Pérez, U. (2002). Aportes de la geomática a la sostenibilidad de los suelos agrícolas. *Seminario estratégico para la producción de los suelos agrícolas, Capítulo Tolima* (págs. 121 – 128). Ibagué: Sociedad Colombiana de Ciencias del Suelos.
- Petters, V. (1954a). Tertiary and Upper Cretaceous foraminifera from Colombia, S. A. *Contr. Cush. Found. Foram. Res.*, 5-1(99), 37-41.
- Pinto R., F. (2013). *Geomática tecnologías de punta*. EE.UU: Palibrio.
- Ponvert-Delisle, D. R., Kelly, F. S., & Reyes Alonso, I. (2012). Las técnicas geomáticas aplicadas en la agricultura: El catastro agrícola. *Revista Ciencias Técnico Agrícolas*, 21(4), 84-92.
- Rust, B. (1978). Depositional Models for Braided Alluvium. *Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 5*, 605-625.
- Rust, B., & Legun, A. (1983). Modern anastomosing-fluvial deposits in arid central Australia, and a Carboniferous analogue in New Brunswick, Canada. *International Association Sedimentologists, Special Publication*(6), 385-392.
- Santiago. (21 de Febrero de 2008). *El estudio de los ríos: El cauce*. Obtenido de La Guía 2000: <https://geografia.laguia2000.com/hidrografia/el-estudio-de-los-rios-el-cauce>
- Scheibe, R. (1934a). Las relaciones entre los pisos de Honda, Gualanday y Barzalosa. *CEGOC*, 1, 63-96.

- Schumm, S. (1968). Speculations concerning paleohydraulic controls on terrestrial sedimentation. *Geological Society of America Bulletin*(79), 1573-1588.
- Serrato, A. (2010). Estudio de la dinámica fluvial del río La Miel, aguas debajo de la central hidroeléctrica miel I. *Instituto Geográfico Agustín Codazzi*.
- Servicio Geologico Colombiano. (2017). *Guía Metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos de masa, Escala 1:100.000*. Bogotá.
- Servicio Geologico Colombiano. (2017). *Guía Metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos de masa, Escala 1:25.000*. . Bogotá.
- Smith, D., & Smith, N. (1980). Sedimentation in anastomosed river systems: examples from alluvial valleys near Banff, Alberta. *Journal of Sedimentary Petrology*(50), 157-164.
- Villota, H. (1991). Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de las tierras. *IGAC*, 8.