



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Evolución de la morfodinámica del sistema fluvial del Río Magdalena durante el Holoceno en la cuenca del Valle Medio del Magdalena entre Barrancabermeja y Aguachica, Colombia.

Luisa Fernanda Meneses Angulo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá DC, Colombia
2023

Evolución de la morfodinámica del sistema fluvial del Río Magdalena durante el Holoceno en la cuenca del Valle Medio del Magdalena entre Barrancabermeja y Aguachica, Colombia.

Luisa Fernanda Meneses Angulo

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Geología

Director:

Gustavo Adolfo Sarmiento Pérez, Ph.D.

Codirectora:

Verónica Torres Acosta, Ph.D.

Línea de Investigación:

Dinámica Fluvial

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá DC, Colombia

2023



Firma estudiante



Firma director



Firma codirectora

A mis padres

y a Agatha y Beka por trasnochar conmigo.

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Luisa Fernanda Meneses Angulo

30/01/2023

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia, por haberme permitido utilizar sus instalaciones e infraestructura para la realización y culminación de este trabajo, el cual se encuentra en el marco del proyecto de Investigación MEGIA: "Modelo multiescala de gestión integral del agua con análisis de incertidumbre de la información para la realización de la evaluación ambiental estratégica (EAE) del subsector de hidrocarburos en el Valle Medio del Magdalena" contrato 157-2018 suscrito con Minciencias, antes Colciencias y financiado por la Agencia Nacional de Hidrocarburos ANH".

A mi director de tesis, el profesor Gustavo Sarmiento, por sus enseñanzas, su guía y su paciencia en este proceso. A mi codirectora Verónica Torres, por su disposición y apoyo. Al profesor Fernando Romero, director del proyecto MEGIA, por todos sus consejos. Aprendí mucho de los tres.

A mis compañeros y amigos del proyecto MEGIA: Dubban Atuesta, Jorge Bermúdez, Leonardo López, Gonzalo Valdivieso, Víctor Villamizar y Antonio Preziosi, por todo el apoyo y contribuciones.

A mis amigos Lorena Morales, Andrés Pardo y Giovanni Peña por su apoyo.

A mis padres que siempre han apoyado mis pasos.

A mis familiares y amigos que me escucharon y animaron a terminar este trabajo y a todos aquellos que no menciono, pero que me acompañaron en esta investigación.

Resumen

Evolution of the morphodynamics of the Magdalena River fluvial system during the Holocene in the Middle Magdalena Valley basin, during the Holocene between Barrancabermeja and Aguachica, Colombia.

El río Magdalena, principal sistema fluvial de Colombia, exhibe un comportamiento de río trezado desde el Valle Superior del Magdalena (VSM), sin embargo, cambia su morfodinámica en el Valle Medio del Magdalena (VMM), de manera que entre las poblaciones de Barrancabermeja y Aguachica presenta tramos intercalados de sistema trezado y anastomosado. Finalmente, al norte de Aguachica se constituye como un río anastomosado. Las posibles explicaciones que se le han dado a este fenómeno sugieren una estrecha asociación entre la tasa de hundimiento de la cuenca con la tasa de sedimentación y a fluctuaciones del nivel del río producto de deglaciaciones en el Holoceno, sin embargo, esta investigación busca analizar la evolución de la morfodinámica del sistema fluvial del río Magdalena y los procesos que ocasionaron la variación del comportamiento del río en el área de estudio, desde la relación entre la geomorfología y la dinámica fluvial. Mediante interpretación de imágenes satelitales, trabajo de campo y estudio de variables hidro-climatológicas, se tuvo como resultado la identificación de los rasgos del sistema fluvial junto con el análisis de los componentes espacio-temporales del mismo y la evaluación de la influencia de las variables hidro-climatológicas en la dinámica del río. De manera que se caracterizaron los procesos que influyeron en su evolución morfodinámica, lo que permitió concluir que factores como: 1. Que el confinamiento del valle y el aumento del nivel base del río, son fenómenos producto del avance de los abanicos aluviales provenientes de la Cordillera Oriental; y 2. Las avulsiones de los canales, desarrolladas por interacción de los componentes del sistema fluvial; son factores que podrían controlar la evolución del río Magdalena de sistema trezado a sistema anastomosado en el área de estudio. Asimismo, se propone un modelo que explica la evolución del sistema fluvial de río trezado a anastomosado.

Palabras clave: (sistema fluvial, río anastomosado, evolución morfodinámica, avulsión, confinamiento).

Abstract

Evolution of the morphodynamics of the Magdalena River fluvial system during the Holocene in the Middle Magdalena Valley basin, during the Holocene between Barrancabermeja and Aguachica, Colombia.

The Magdalena River, Colombia's principal river system, exhibits a braided river behavior from the Upper Magdalena Valley (VSM), nevertheless it changes its morphodynamics in the Middle Magdalena Valley (VMM), such between the towns of Barrancabermeja and Aguachica the Magdalena River presents interspersed sections of braided and anastomosed system. Finally from Aguachica onwards, it becomes an anastomosed river. The possible explanations that have been given to this phenomenon suggest a close association between the basin subsidence rate with the sedimentation rate, and fluctuations in the river level due to the Holocene deglaciation. Nevertheless, this research aims to analyze the evolution of the morphodynamics of the Magdalena River fluvial system and the processes that caused the variation of the behavior of the study area, from the relationship between geomorphology and fluvial dynamics. Through the interpretation of satellite images, field work and the study of hydro-climatological variables, the identification of the features of the fluvial system was obtained together with the análisis of its spatio-temporal components and the evaluation of the influence of hydro-climatological variables on the river's dynamics. Thus, the processes that influenced its morphodynamic evolution were characterized, which lead to the conclusion that factors as: 1. The valley confinement and the increase of the base level of the river, are both phenomena resulting from the advance of alluvial fans coming from the Eastern Cordillera; and 2. The avulsions of the channels, developed by the interaction of the components of the fluvial system; both are factors that might control the evolution of the Magdalena River from a braided system to an anastomosed system in the study area. Likewise, a model is proposed that explains the evolution of the fluvial system from braided to anastomosed river.

Keywords: (Fluvial system, anastomosing river, morphodynamics evolution, avulsion, confinement)

Contenido

	Pág.
Resumen	XI
Lista de figuras	XVI
Lista de tablas	XVII
Lista de Símbolos y abreviaturas	XVIII
Introducción	1
Área de estudio	4
1. Aspectos teóricos	7
1.1 Fenómenos del Niño y la Niña.....	7
1.2 Ciclo hidrológico	8
1.3 Dinámica fluvial	11
1.4 Generación de los ríos anastomosados	16
1.5 Contexto geológico.....	19
1.5.1 Condiciones climáticas durante el Holoceno en el AE.....	24
2. Metodología	27
2.1 Fase I: Mapa multitemporal	27
2.2 Fase II: Comisión de campo	31
2.3 Fase III: Variables hidro-climatológicas	31
2.4 Fase IV: Control de calidad	32
3. Resultados	33
3.1 Unidades y rasgos fluviales.....	33
3.1.1 Unidades de agua superficial.....	34
3.1.2 Unidades de depósitos	36
3.1.3 Unidades de divagación.....	38
3.1.4 Rasgos de la dinámica fluvial.....	38
3.2 Componente espacial de la dinámica fluvial	40
3.2.1 Zona sur	42
3.2.2 Zona centro	46
3.2.3 Zona norte	50
3.3 Componente temporal de la dinámica fluvial	51
4. Discusión	57
4.1 Unidades y rasgos fluviales.....	57

XIV Evolución de la morfodinámica del sistema fluvial del río Magdalena durante el Holoceno en la cuenca del VMM entre Barrancabermeja y Aguachica, Colombia

4.2	Condiciones geológicas y geomorfológicas.....	59
4.3	Variables hidroclimatológicas.....	70
4.4	Evolución del sistema fluvial	72
5.	Conclusiones y recomendaciones	77
5.1	Conclusiones	77
A.	Anexo: Afluentes del río Magdalena en el AE.....	81
B.	Anexo: Ciclo hidrológico.....	82
C.	Anexo: Proceso dominante del río según ubicación en la cuenca	83
D.	Anexo: Características programas Landsat.....	84
E.	Anexo: Mapa multitemporal de dinámica fluvial - AE.....	85
F.	Anexo: Mapa de relieve - AE	86
G.	Anexo: Mapa de pendientes - AE.....	87
H.	Anexo: Mapa de cuencas - AE	88
I.	Anexo: Mapa de SSP - AE	89
J.	Anexo: Mapa de TWI en el AE	90
K.	Anexo: Mapa de EVI en el AE.....	91
L.	Anexo: Mapa de precipitación en el AE.....	92
M.	Anexo: VALORES ONI	93
N.	Anexo: Canales activos.....	94
O.	Anexo: Lagunas y ciénagas	95
P.	ANEXO: Barras de sedimento.....	96
Q.	ANEXO: Dique natural	97
R.	ANEXO: Llanura inundación proximal.....	98
S.	ANEXO: Columna estratigráfica llanura inundación proximal	99
T.	ANEXO: Llanura inundación distal	100
U.	ANEXO: Columna estratigráfica llanura inundación proximal	101
V.	ANEXO: <i>Crevasse splay</i>	102
W.	ANEXO: Meandros y cauces abandonados	103
X.	ANEXO: Parámetros barras y canal zona sur.	104

Y. ANEXO: Parámetros barras y canal zona centro.	105
Z. ANEXO: Área cuerpos de agua vs. ONI	107
AA. ANEXO: Variación área cuerpos de agua (zona sur, centro y norte) vs. ONI... ..	108
Bibliografía	109

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1: Área de estudio (AE).....	4
Figura 1-1: Modelo hidrológico en el AE	10
Figura 1-2: Tipos de depósito de los ríos.....	12
Figura 1-3: Estabilidad de los canales según la clase de río	14
Figura 1-4: Proceso de generación de una avulsión.....	17
Figura 1-5: Perfil topográfico de un río anastomosado	18
Figura 1-6: Procesos en los canales de los ríos anastomosados	18
Figura 1-7: Estilos estructurales del VMM	20
Figura 1-8: Abanicos presentes en el AE	23
Figura 2-1: Diagrama de procesos de la metodología empleada.....	29
Figura 3-1: Unidades fluviales	35
Figura 3-2: Mapa de rasgos	39
Figura 3-3: Zonas para la interpretación y análisis de la dinámica fluvial.....	41
Figura 3-4: Unidades fluviales zona sur.....	44
Figura 3-5: Unidades fluviales tramo A zona centro.	48
Figura 3-6: Unidades fluviales tramo B zona centro.	49
Figura 3-7: Unidades fluviales zona norte.....	52
Figura 3-8: Variación temporal del sistema fluvial en el AE	54
Figura 4-1: Variación espacial del sistema fluvial en el AE	58
Figura 4-2: Variación espacial del sistema fluvial en el AE.....	60
Figura 4-3: Variación espacial del sistema fluvial en cada una de las zonas del AE.	62
Figura 4-4: Esquema avulsión zona centro.....	63
Figura 4-5: Delta elongado desarrollado en la zona centro.....	65
Figura 4-6: Análisis A cicatrices de migración.	66
Figura 4-7: Análisis B cicatrices de migración.	67
Figura 4-8: Análisis C cicatrices de migración.	68
Figura 4-9: Perfil topográfico del río Magdalena a lo largo del AE.	69

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1: Características del río Magdalena en el AE	5
Tabla 1-1: Tipos de río	13
Tabla 2-1: Ecuaciones MNDWI, SSP y TWI	30
Tabla 3-1: Unidades y rasgos fluviales.....	34
Tabla 3-2: Parámetros del Río Magdalena en los tramos de la zona sur.....	43
Tabla 3-3: Parámetros del Río Magdalena en los tramos de la zona centro.....	47
Tabla 3-4: Parámetros del río Magdalena en los tramos de la zona norte.....	51

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos

Símbolo	Término	Unidad SI	Ecuación
%	Porcentaje		
°C	Grados Celsius		
w	Ancho del canal	m	2-2
g	Gravedad	m/s ²	2-2
Q	Caudal	m ³ /s	2-2
\tan	Tangente		2-3

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Ecuación
α	Área de la cuenca	m ²	2-3
β	Pendiente	° grados o radianes	2-2 y 2-3
ρ	Densidad del agua	g/cm ³	2-2
\ln	Logaritmo natural		2-3

Superíndices

Superíndice	Término
2	Cuadrado
3	Cúbico

Abreviaturas

Abreviatura Término

<i>AE</i>	Área de estudio
<i>cm</i>	Centímetros
<i>DEM</i>	Modelo digital de elevación
<i>DRX</i>	Difracción de rayos X
<i>ENSO</i>	<i>El Niño-Southern Oscillation</i>
<i>EVI</i>	<i>Enhanced vegetation index</i>
<i>FRX</i>	Fluorescencia de rayos X
<i>GEE</i>	<i>Google Earth Engine</i>
<i>IDEAM</i>	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
<i>IGAC</i>	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
<i>IUCN</i>	<i>International Union for Conservation of Nature</i>
<i>km</i>	Kilómetros
<i>l</i>	Litros
<i>m</i>	Metros
<i>MEGIA</i>	Modelo multiescala de gestión integral del agua
<i>mm</i>	Milímetros
<i>MNDWI</i>	<i>Modified Normalized Difference Water Index</i>
<i>msnm</i>	Metros sobre el nivel del mar
<i>NASA</i>	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
<i>NDWI</i>	<i>Normalized Difference Water Index</i>
<i>NIR</i>	<i>Near Infrared band</i>
<i>NOAA</i>	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
<i>ONI</i>	<i>Oceanic Niño Index</i>
<i>s</i>	Segundos
<i>SR</i>	<i>Surface Reflectance</i>
<i>SRTM</i>	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
<i>SSP</i>	<i>Specific Stream Power</i>
<i>SWIR</i>	<i>Short-wavelength infrared band</i>
<i>T1</i>	Tiempo 1
<i>T2</i>	Tiempo 2
<i>T3</i>	Tiempo 3
<i>T4</i>	Tiempo 4
<i>TOA</i>	<i>Top of the Atmosphere</i>
<i>TRMM</i>	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
<i>USGS</i>	<i>United States Geological Survey</i>
<i>VIM</i>	Valle inferior del Río Magdalena
<i>VMM</i>	Valle medio del Río Magdalena
<i>VSM</i>	Valle superior del Río Magdalena
<i>W</i>	<i>Watts</i>
<i>WWF</i>	<i>World Wide Fund for Nature</i>

Introducción

Los ríos hacen parte fundamental del ciclo del agua, proveen de agua dulce a diferentes ecosistemas y son parte primordial en los asentamientos de las sociedades por donde pasan. Son agentes modeladores del paisaje y contribuyen al continuo desarrollo de las geoformas sobre la superficie terrestre, lo que necesariamente conduce a la producción y posterior redistribución de los sedimentos (García-Chevesich, 2009).

El río Magdalena es el sistema fluvial más importante de Colombia y ha jugado un papel crucial en el desarrollo nacional, en los ámbitos social, económico, demográfico, urbano e histórico. Nace a 3.685 msnm cerca de la laguna de La Magdalena ubicada en el páramo de Las Papas en el departamento del Huila, recorre el país entre la Cordillera Central y la Cordillera Oriental y desemboca en el mar Caribe en Bocas de Ceniza muy cerca de Barranquilla, en el departamento del Atlántico. Su cuenca hidrográfica tiene un área de 257.000 km² (Villa-Navarro et al., 2006) y se divide en Valle Superior (VSM), Valle Medio (VMM) y Valle Inferior (VIM). En el Valle Superior el río recorre 640 km aproximadamente desde su nacimiento hasta Ibagué en el departamento del Tolima; en el Valle Medio que inicia en Ibagué (Tolima) y finaliza en El Banco (Magdalena), el río recorre cerca de 540 km. Y, por último, el Valle Inferior comprende desde El Banco hasta la desembocadura del río en Bocas de Ceniza muy cerca de Barranquilla (Atlántico), donde el río tiene una longitud de 515 km e incluye el canal del Dique, que comienza en Calamar, Bolívar; y llega hasta la bahía de Cartagena (Villa-Navarro et al., 2006).

Nardini et al., (2020) realizan un análisis del comportamiento del río Magdalena, en el que describen que, el sistema fluvial cambia su morfodinámica en el VMM, puesto que, al sur de Barrancabermeja (población ubicada en el VMM) el río se constituye en un cauce trezado suavemente sinuoso a rectilíneo con una estrecha llanura de inundación, mientras que, al norte de Barrancabermeja, el río se comporta como un río anastomosado, esa variación en el sistema fluvial implica cambios en la geomorfología circundante relacionada a la evolución del río (Romero et al., 2018). Sin embargo, a diferencia de los

ríos meándricos o rectos, el origen de los ríos anastomosados no está bien entendido (Morón-Polanco, 2016) y las posibles explicaciones que se le han dado al carácter anastomosado que presenta el río Magdalena desde Barrancabermeja hacia el norte, sugieren una estrecha asociación de la tasa de hundimiento de la cuenca con la tasa de sedimentación (Smith, 1986; Latrubesse, 2003) y a fluctuaciones del nivel del río producto de deglaciaciones en el Holoceno (Smith, 1986; Van der Hammen, 1986; Latrubesse, 2003).

Por lo tanto, este trabajo nació a partir de la siguiente pregunta de investigación: ¿además de las posibles explicaciones mencionadas anteriormente, hay otros factores geomorfológicos y/o geológicos que han influido en la evolución del río Magdalena de sistema trezado a anastomosado a partir de Barrancabermeja en el VMM? Y su hipótesis es: Los abanicos aluviales como factores geomorfológicos-geológicos podrían influir en la evolución del río Magdalena de sistema trezado a sistema anastomosado a partir de Barrancabermeja en el VMM. De manera que esta investigación tiene como objetivo principal analizar la evolución de la morfodinámica del sistema fluvial del río Magdalena durante el Holoceno entre las poblaciones de Barrancabermeja (Santander) y Aguachica (Cesar), mediante los siguientes objetivos específicos: En primer lugar, determinar los rasgos de la cuenca que permitan definir las características y funcionamiento del sistema fluvial actual del río Magdalena; en segundo lugar, analizar la influencia de las condiciones geológicas y geomorfológicas en la dinámica fluvial del río Magdalena y en tercer lugar, analizar la influencia de las relaciones de variables hidro-climatológicas (precipitación, escorrentía, infiltración, inundación) en la dinámica fluvial del río Magdalena. Para lo cual se realizó la interpretación de imágenes satelitales junto con un análisis geológico y geomorfológico del área de estudio.

Por otro lado, en términos generales, el clima, la vegetación, la topografía y el contexto geológico y tectónico influyen en los procesos geomorfológicos y en la dinámica fluvial, de manera que entender la dinámica del río y cómo ha evolucionado su morfología, permitirá ampliar el conocimiento de las disciplinas centradas en el registro sedimentario y ayudar a la interpretación de depósitos fluviales preservados. Además, aportaría conocimiento para la gestión del riesgo, el uso del suelo y la planeación y el desarrollo de sectores como el agrícola, minero y energético, que tienen amplia presencia en el área de estudio.

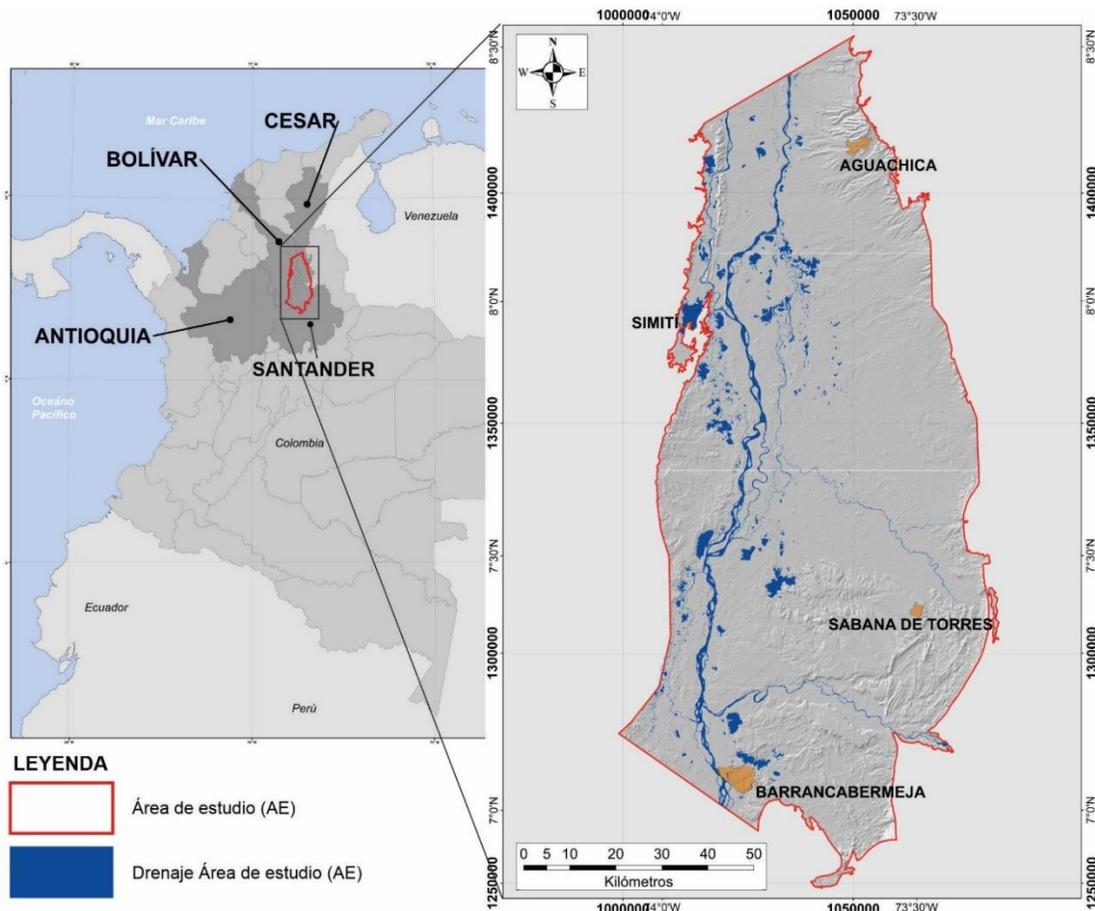
En las siguientes secciones se presentan algunas características climatológicas del área de estudio junto con el comportamiento del río, luego se explican los conceptos y bases teóricas sobre las cuales se fundamenta esta investigación y se hace una descripción de las unidades litológicas incluyendo los depósitos cuaternarios y los eventos durante el Holoceno que pudieron influir en la dinámica fluvial del río Magdalena. Posteriormente se explica cómo se llevó a cabo la investigación y los resultados obtenidos, que son en primera medida las unidades y rasgos fluviales determinados en el área de estudio, seguidos por el componente espacial y temporal de la dinámica fluvial y finalmente, se hace una interpretación y análisis de los resultados, en los que se expone, entre otros hallazgos, que entre las poblaciones de Barrancabermeja y Aguachica el río Magdalena presenta tramos intercalados de sistema trenzado y anastomosado.

Esta investigación se desarrolló en el marco del proyecto MEGIA – “Modelo multiescala de gestión integral del agua con análisis de incertidumbre de la información para la realización de la evaluación ambiental estratégica (EAE) del subsector de hidrocarburos en el Valle Medio del Magdalena” contrato 157 suscrito con Minciencias y permite resolver uno de los objetivos del producto 3 del mismo que es estudiar la geodinámica fluvial del área de estudio.

Área de estudio

La presente investigación está enfocada en la evolución del sistema fluvial del río Magdalena, el área de estudio (en adelante AE) se encuentra en la parte norte del VMM, comprendida entre los municipios de Barrancabermeja en el departamento de Santander y Aguachica en el departamento del Cesar, como se muestra en la **Figura 1**.

Figura 1: Área de estudio (AE)



Fuente: Elaboración propia.

El AE presenta una temperatura promedio de 29°C, una pendiente promedio de 0,35 m/km, una altura entre 50 y 75 msnm y un régimen de lluvia bimodal, es decir, dos periodos de lluvia, de abril a mayo y de octubre a noviembre, separados por dos periodos secos al año, con una precipitación promedio anual de 2.390 mm/año. La Tabla 1 indica las características del río Magdalena en el AE.

Tabla 1: Características del río Magdalena en el AE

Características del río Magdalena en el AE	
Caudal de entrada	2.942 m ³ /s
Caudal de salida	4.320 m ³ /s
Longitud	620 km aproximadamente
Principales afluentes	Río Sogamoso, Río Cimitarra y Río Lebrija
Brazos	Brazo Simití, Brazo Morales, Brazuelo el Dique
Ciénagas de mayor extensión	San Silvestre, Llanito, Yarirí, Paredes, Canaletal, Colorado Simití, Tisquirama, el Dique.
Tipo de río	Anastomosado
Confinamiento	No confinado lateralmente
Textura material de canal	Arena
Diques	Completos
Ciénagas	Completas
Meandros abandonados	Gran presencia al sur, ausentes en el norte
Paleocanales	Prevalecientes
Barras longitudinales	Completas
Barras de punta	Ocasionales
Unidad geomorfológica que rodea al río	Llanura de inundación y terraza

Fuente: Recopilado de Nardini et al (2020).

Los principales afluentes del río Magdalena en el AE son los ríos Cimitarra, Lebrija y Sogamoso. El río Cimitarra nace en la confluencia del río Tamar con el río Ite, en el flanco oriental de la Serranía de San Lucas, cerca de la población de Cantagallo y desemboca en el río Magdalena en la Población de San Pablo, ambos municipios se encuentran en el departamento de Bolívar, la longitud total del Río Cimitarra es de 198 km aproximadamente y dentro del AE su longitud es 44 km aproximadamente. Mientras que, el río Lebrija nace en la confluencia del río Salamaga con el río Cáchira del Sur, cerca del corregimiento El Diamante y desemboca en un brazo del río Magdalena en el corregimiento San José de Los Chorros, ambas poblaciones se encuentran en el departamento de Santander, la longitud total del río Lebrija es de 160 km aproximadamente y dentro del AE su longitud es 28 km aproximadamente. Finalmente, el río Sogamoso toma su nombre a partir de la confluencia del río Suarez con el río Chicamocha, en el Cañón del Chicamocha, cerca del municipio Los Santos y desemboca en el río Magdalena en Barrancabermeja, ambos se

encuentran en el departamento de Santander, la longitud total del río Sogamoso es de 150 km aproximadamente y dentro del AE su longitud es 33 km.

Otros afluentes del río Magdalena en el AE son el río Boque, que desemboca en la ciénaga Brava, el río Santo Domingo desemboca en la ciénaga el Papal – Santo Domingo y el río San Alberto que se une al río Cáchira Espíritu Santo y desemboca en el complejo cenagoso de Barranca Lebrija. En los documentos ANEXOS (**ANEXO A**) se relacionan los afluentes del río Magdalena dentro del AE.

De acuerdo con Smith (1986), la tasa de sedimentación del río Magdalena es de 3,8 mm/año y la tasa de degradación promedio en la cuenca es de 4,5 mm/año. La hidrología fluctúa de acuerdo con la precipitación y el río genera inundaciones de 45 a 60 días al año entre octubre, noviembre y diciembre en la mayor parte de la cuenca. El rendimiento de sedimentos varía paralelamente a los patrones de lluvia, de manera que en años con fenómeno del Niño pueden presentarse descargas de 2.000 a 3.000 m³/s, en contraste a los años con fenómeno de la Niña cuyas descargas son hasta de 12.000 m³/s (Mora y Martínez, 2005); los embalses ubicados en la zona montañosa de la cuenca actúan como trampa de sedimentos y su influencia es considerable para el balance sedimentario en los tramos aguas abajo. Por otro lado, se ha estimado que los sedimentos del cuaternario en el VMM tienen entre 150 a 250 metros de espesor, pero en algunos sectores hay acumulaciones de hasta 400 m de sedimento de edad plio-pleistoceno (Jaramillo *et al.*, 2015).

1. Aspectos teóricos

En este capítulo se explican los conceptos y bases teóricas sobre las cuales se fundamenta esta investigación, para empezar, se presentan algunas características climatológicas como el ONI y los fenómenos del Niño y la Niña. Posteriormente se explica el ciclo hidrológico, en el que los ríos desempeñan un papel importante y se definen algunos conceptos de la dinámica fluvial, luego se explican los modelos que diferentes autores han propuesto para la generación de ríos anastomosados. Finalmente, se hace una breve descripción de las unidades litológicas, incluyendo los depósitos cuaternarios y los eventos durante el Holoceno que pudieron influir en la dinámica fluvial del río.

1.1 Fenómenos del Niño y la Niña

De acuerdo con el DNP (2017) en condiciones neutras, los vientos alisios circulan desde las zonas del Océano Pacífico con alta presión atmosférica (Pacífico Ecuatorial Oriental) hacia las zonas con baja presión atmosférica (Pacífico Ecuatorial Occidental), asimismo las aguas con mayor temperatura del Océano Pacífico circulan en dirección Este a Oeste hasta llegar a Indonesia y Australia, donde se acumulan y estancan. Este movimiento mantiene el agua fría del Océano Pacífico en las costas de Sur América, generando lluvias en el Pacífico Occidental y condiciones secas en el Pacífico Oriental. En presencia del Fenómeno El Niño, que es un evento de variabilidad climática y hace parte del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENSO), los vientos alisios se debilitan o en algunas ocasiones se revierten, lo que hace que las aguas superficiales cálidas permanezcan en el Pacífico Ecuatorial Central y Oriental, particularmente sobre las costas de Ecuador, Perú y sur de Colombia.

Según el DNP (2017), el Índice Oceánico El Niño (ONI), es una medida del ENSO y sus fases: cálida (El Niño) y fría (La Niña) en el Pacífico Ecuatorial Central, corresponden al

promedio móvil de tres meses de las anomalías de la temperatura superficial del Océano Pacífico. Las autoridades meteorológicas nacionales e internacionales declaran el inicio de un Fenómeno El Niño cuando se reporta un incremento del ONI y el evento es calificado como débil cuando la anomalía supera en $0,5^{\circ}\text{C}$. Los niveles neutros a moderado cuando la anomalía excede 1°C y un nivel fuerte cuando el evento supera el umbral de los $1,5^{\circ}\text{C}$. Desde que se iniciaron las mediciones internacionales del Fenómeno El Niño en 1950 se han presentado 22 de estos eventos, de los cuales seis han sido catalogados como fuertes, ocho como moderados y ocho como débiles.

En Colombia, desde 1970 se han presentado aumentos en la temperatura del nivel del mar (DNP, 2017) que han generado variación en las precipitaciones y que han conducido a que se presenten eventos extremos más frecuentes y notorios.

1.2 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es el proceso por el cual el agua fluye entre la atmósfera y la tierra, los elementos involucrados en este ciclo son: precipitación, escorrentía, infiltración y evaporación. De acuerdo con (Campos Aranda, 1998) la precipitación es el proceso por el cual el agua contenida en la atmósfera se distribuye de manera irregular en tiempo y espacio por la superficie terrestre, en Colombia la precipitación más abundante es la lluvia, puesto que el granizo es ocasional y la nieve solo se da en montañas más altas de 4.700 msnm. Para medir la lluvia, se calcula la altura en milímetros de la lámina de agua que cubriría un área proyectada después de llover, de modo que 1 mm recolectado equivale a 1 l/m². Adicionalmente, un año hidrológico corresponde a un periodo de 12 meses a lo largo del cual se miden las precipitaciones sobre una determinada cuenca hidrográfica.

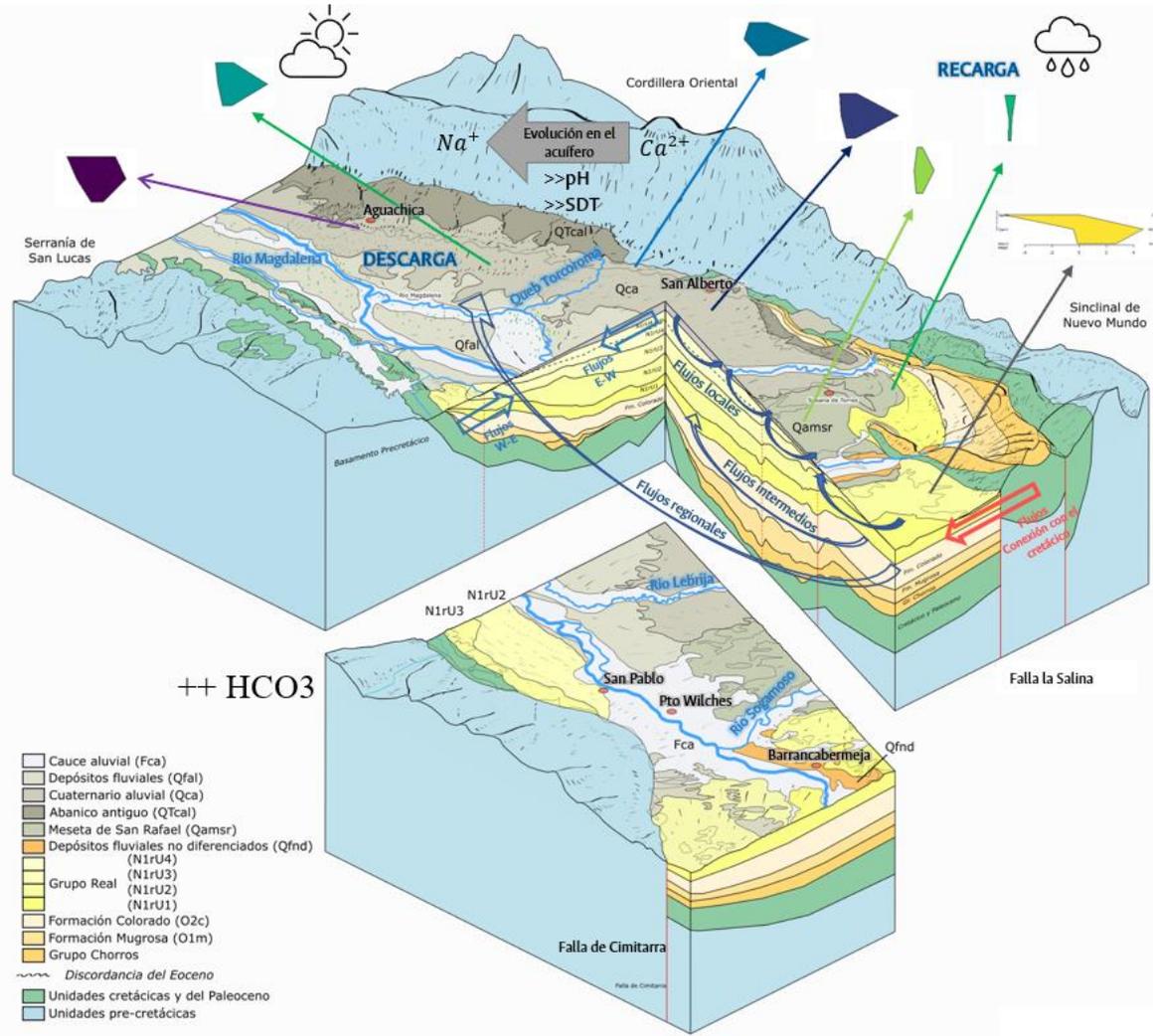
Una vez la lluvia cae sobre una zona determinada interactúa con la primera capa de suelo llamada “zona radicular” para generar escorrentía. La escorrentía es el proceso por el cual el agua discurre por acción de la gravedad sobre la superficie del terreno hasta llegar a los ríos o quebradas y se mide mediante el coeficiente de escorrentía que es la diferencia entre el agua que escurre y la que se filtra, el resultado es un valor adimensional entre 0 y 1. El agua que no discurre, se infiltra en el suelo, lo que se conoce como infiltración y se mide en mm/hora mediante la tasa de infiltración (Campos Aranda, 1998). La infiltración

es un proceso complejo que depende de la precipitación, el contenido inicial de agua en el suelo, la conductividad del suelo, la pendiente del terreno, el tipo de cobertura vegetal y la temperatura. Una parte del agua que se infiltra permanece en las capas más superficiales del suelo, mientras que la otra parte del agua puede infiltrarse hasta recargar los acuíferos (USGS, 2019) donde el agua puede ser almacenada por días, meses, años, siglos o milenios. Eventualmente el agua subterránea descarga en cuerpos superficiales y dependiendo del volumen de descarga, el agua subterránea se convierte en un aporte importante para las fuentes superficiales (Grupo de Investigación HYDS, 2021).

Por otro lado, el agua que va quedando de la escorrentía y la infiltración, es evaporada o entra en contacto con la vegetación para generar evapotranspiración. Donde la evaporación es el proceso por el cual el agua líquida ingresa en forma de vapor a la atmósfera. De acuerdo con (USGS, 2019) los océanos, mares, lagos y ríos proveen alrededor del 90% de humedad a la atmósfera vía evaporación mientras que el restante 10% proviene de la transpiración de las plantas, que es el proceso que complementa la evapotranspiración. Esta secuencia se repite continuamente y la valoración de los diversos componentes del ciclo, tanto en cantidad como en calidad, permiten conocer la distribución espacial y temporal del agua, así como caracterizar el régimen de los ríos, la estacionalidad de estos y la oferta del recurso (Campos Aranda, 1998). En los documentos ANEXOS **(ANEXO B)** resume el ciclo del agua.

En 2021 el grupo de investigación HYDS realizó un modelo hidrológico (**Figura 1-1**) que explica que en el AE la precipitación está condicionada a las características fisiográficas y geomorfológicas de la Serranía de San Lucas y de la Cordillera Oriental, por ello en las partes altas de la montaña hay mayor lluvia. Sin embargo, en esas zonas hay muy poca infiltración y recarga de acuíferos, como consecuencia, tanto en la Serranía de San Lucas, como en la Cordillera Oriental prima la escorrentía debido a la topografía inclinada. Lo opuesto sucede en la planicie del río Magdalena, donde la baja pendiente de la zona permite que las aguas escurridas desde las montañas se acumulen y así se presenten las mayores recargas de acuíferos; sin embargo, las altas temperaturas del valle también favorecen la evaporación. Otro hallazgo del Grupo de Investigación HYDS (2021) es que la estacionalidad de las precipitaciones permite que, en las épocas de lluvia, las capas de suelo alcancen su mayor saturación y, por ende, en estos periodos de tiempo se presente la mayor recarga.

Figura 1-1: Modelo hidrológico en el AE



Fuente: Tomado del Grupo de Investigación HYDS (2021).

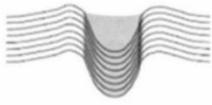
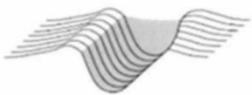
El Grupo de Investigación HYDS (2021) identificó flujos subterráneos regionales en dirección Sur-Norte, que descargan en los cuerpos cenagosos, asimismo encontraron evidencias de flujos intermedios y locales que descargan hacia los ríos y quebradas, también establecieron una conexión en sentido Oriente-Occidente desde la Cordillera Oriental hacia el río Magdalena, con una fuerte influencia tanto en el río como en las ciénagas, destacando la Meseta de San Rafael como una zona de recarga local, finalmente determinaron que los ríos Sogamoso y Magdalena actúan como zonas de descarga del acuífero en el mismo sector.

1.3 Dinámica fluvial

De acuerdo con Schumm (1977), la morfodinámica fluvial estudia el conjunto de procesos que generan cambios en los componentes espacial y temporal de los sistemas fluviales. En este contexto y teniendo en cuenta que, los ríos actúan permanentemente como agentes que erosionan, transportan y depositan sedimentos, Valbuena (2017) describió tres zonas principales con procesos distintivos en cada una de ellas: 1. Producción: Corresponde a la zona superior de la cuenca en donde las primeras corrientes son formadas y predomina el proceso de escorrentía y producción de sedimentos debido a la erosión generada por la energía del agua producto de las altas pendientes. 2. Transferencia: Corresponde a la parte central de la cuenca, donde mediante escorrentía, las pendientes medias permiten el transporte de sedimentos provenientes de la zona superior. 3. Sedimentación: Corresponde a la parte inferior de la cuenca, que se caracteriza por presentar pendientes menores que facilitan la formación de depósitos, ya que a medida que la pendiente disminuye pierde energía y por ende capacidad erosiva. En los documentos ANEXOS (**ANEXO C**) se puede apreciar el proceso dominante en los ríos según su ubicación en una cuenca determinada.

Estas dinámicas se explican en la **Figura 1-2** mediante el perfil transversal de un canal, donde en un T1 (tiempo 1) se aprecia que la superficie del agua es un poco más baja que la superficie del terreno, sin embargo, como el río viene cargado con agua y sedimento, este último se va depositando en el fondo del canal creando una columna de material que va a generar que la superficie del agua alcance la superficie del terreno, o incluso que el agua inunde el terreno circundante al canal. A medida que esto sucede se acumula sedimento tanto en el fondo del canal, como al borde, que corresponde al dique natural del cauce, conformado por el sedimento más fino que va en suspensión, tal como se aprecia en el T2 (tiempo 2). Cuando el dique se rompe, un volumen de agua se derrama por la fisura sobre el terreno circundante generando un *crevasse splay*, que es un rasgo geomorfológico en forma de abanico fluvial, adyacente al canal de un río. El T3 (tiempo 3) corresponde a la divagación horizontal del canal que a su paso va dejando depósitos de fondo de canal y de borde, y finalmente, el T4 (tiempo 4) corresponde a la combinación de la divagación horizontal y vertical de un canal.

Figura 1-2: Tipos de depósito de los ríos

		PRODUCTO	TIPO DE DEPÓSITO	PROCESO
T1	A/E del cuerpo de arena es igual a A/E del canal		- Relleno de canal	Sedimentos acumulados en canales abandonados o en canales que han gradado. Pueden contener sedimentos gruesos del lecho y sedimentos finos de la llanura de inundación.
T2	A cuerpo de arena es igual a A del canal E cuerpo de arena es mayor a P del canal		<u>De llanura de inundación:</u> - Acreción vertical del canal	Sedimentos finos en suspensión son depositados en la llanura de inundación. Incluye los diques naturales y pantanos, lagos o ciénagas.
T3	A cuerpo de arena es mayor a A del canal E cuerpo de arena es igual a P del canal		<u>De borde de canal:</u> - Acreción lateral	Diferentes tipos de barras de sedimento y diques que se han preservado y que se encuentran en la llanura de inundación, debido al desplazamiento de canales.
T4	A cuerpo de arena es mayor a A del canal E cuerpo de arena es mayor a P del canal		- Acreción vertical - Acreción lateral	

A: Ancho E: Espesor P: Profundidad

Fuente: Tomado y modificado de: Makaske, B. (2001); Huggett, R. (2011); Morón-Polanco (2016).

Los ríos se clasifican según su forma de planta en rectos, trenzados, meándricos o anastomosados (Morón-Polanco, 2016), estos rasgos son producto de la interacción entre el flujo de agua y movimiento de sedimentos (**Tabla 1-1**). Los mega ríos, que corresponden a ríos con descargas promedio mayores de 17.000 m³/s tienden a configurarse como ríos anastomosados (Morón-Polanco, 2016), cuyos canales son muy estables, ya que presentan bajo *stream power* debido a sus bajas pendientes y llanuras de inundación. De acuerdo con Nanson y Knighton (1996), los ríos anastomosados se presentan en todo tipo de configuraciones, contrario a lo que se creía que solo ocurrían en configuraciones de baja energía.

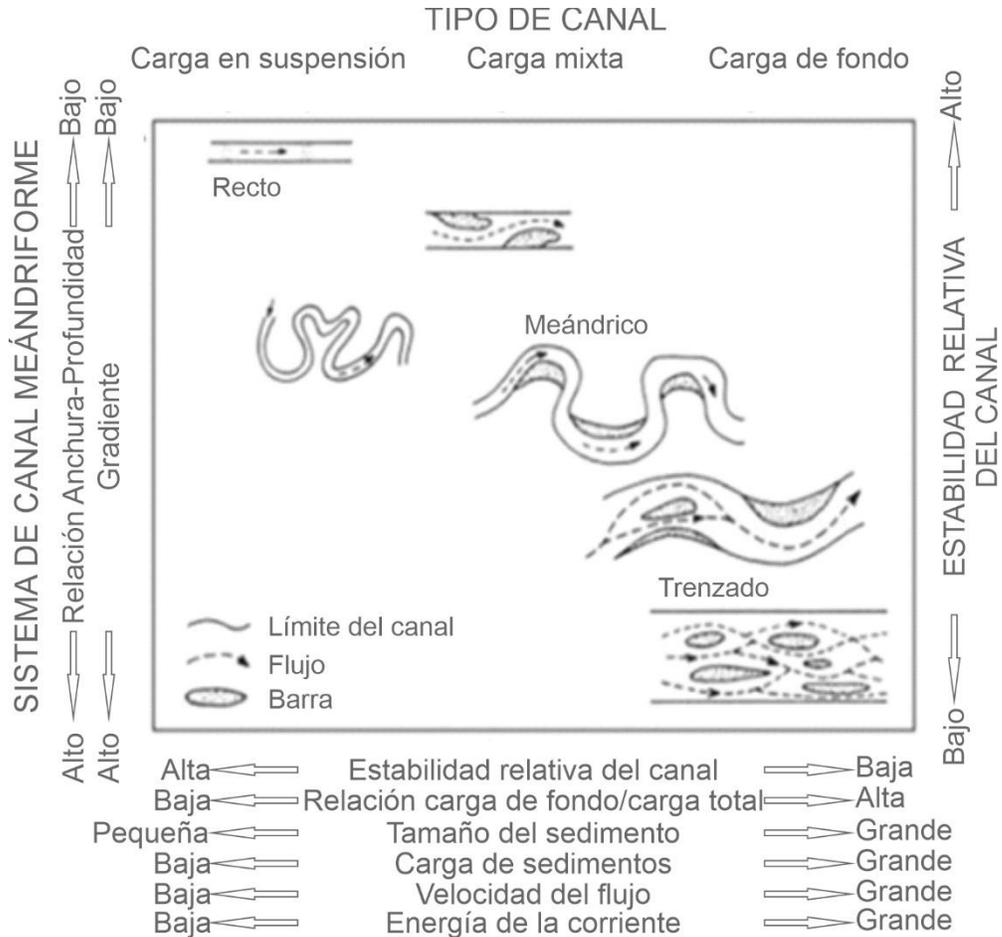
Tabla 1-1: Tipos de río

Tipo de río	Índice de sinuosidad	Relación trenza-canal	Gradiente	Otras características
Recto	De 1 a 1,25.	1	0,5% o más	Presentan acreción vertical y dentro de sus depósitos se encuentran los rellenos de canal y los diques naturales. Son ríos muy confinados y su sedimento en suspensión es rico en lodo.
Meándricos	Valores mayores a 2, llegando incluso a trazados tortuosos.	1	Menor a 0,1%	Tienen altas cargas de sedimento suspendido (lodo y arena) y distribución asimétrica de la velocidad de flujo, de manera que erosionan afuera de la curva y sedimentan dentro de la curva. Migran varios metros por año.
Trenzados	De 1,25 a 1,5.	Mayor a 1	De 0,1% a 0,5%	Consisten en un solo canal con diferentes cursos que se bifurcan en ángulos agudos y están separados por barras de sedimento, que en perfil longitudinal presentan forma convexa. Exhiben un grado de entrelazamiento entre 5% y 65%.
Anastomosados	De 1,5 a 2.	Mayor a 1	Menor a 0,1%	Sus llanuras de inundación representan del 70 al 90% del área fuera del canal. Consisten en múltiples canales que se bifurcan en ángulos rectos a obtusos, con un grado de bifurcación del 5% al 65% y al dividirse, el stream power y la carga de sedimento se distribuye en cada nuevo curso.

Información compilada de Smith (1986); Ferguson (1987); Makaske (2001); Latrubesse (2008) y Ochoa (2011).

Además de la forma de los ríos vista en planta, la energía de estos también es una característica distintiva de cada tipo de río, que a su vez determina el tamaño y tipo de sedimento que carga, junto con la velocidad de flujo y la estabilidad de los canales (**Figura 1-3**).

Figura 1-3: Estabilidad de los canales según la clase de río



Fuente: Tomado y modificado de Schumm (1977).

De acuerdo con Ochoa (2011), las terrazas dan una apariencia escalonada a la sección transversal del valle de un río; se forman cuando una corriente disecta sus propios depósitos debido a un descenso en el nivel base de erosión y/o a la divagación horizontal del río, siguiendo la secuencia de incisión, ensanchamiento del nuevo valle y nueva sedimentación, este proceso se puede repetir varias veces generando nuevos niveles de terrazas. Otro tipo de terrazas se originan cuando un sector del valle o llanura de

inundación de un río es afectado tectónicamente de manera intermitente, lo que conduce al basculamiento del terreno y descenso gradual del nivel base de erosión. Ochoa (2011) también sugiere que el número de terrazas indica la naturaleza y la magnitud de la inestabilidad de un cauce, por otro lado, indica que sobre las terrazas más recientes ocurren suelos poco desarrollados y a medida que aumenta la antigüedad el desarrollo de vegetación incrementa.

En este sentido a continuación, se definen algunos términos de dinámica fluvial de acuerdo con Makaske (2001) y otras referencias:

- Densidad de drenaje: Corresponde a la suma de la longitud de los segmentos dividido en el área total de la cuenca.
- Frecuencia del drenaje: Corresponde al número de segmentos dividido en el área total del drenaje.
- Índice de sinuosidad: Corresponde a la longitud medida a lo largo del canal, dividida en la distancia en línea recta, desde punto inicial al punto final del canal.
- Relación trenza-canal: Se define como la suma de las longitudes de todos los cauces en un canal, dividida en la longitud del canal o cauce más ancho.
- Estabilidad lateral: Se entiende como la permanencia en términos espaciales y temporales de la geometría de un cauce, implica el caudal y la carga de sedimentos.
- Esquema de Horton - Strahler: En 1945 Horton propuso un esquema de ordenamiento para las redes de drenaje, que fue perfeccionado por Strahler (1957), generando el esquema de Horton – Strahler que es el más usado en hidrología actualmente. Las reglas básicas de proceso de ordenamiento son los siguientes: 1. Los segmentos que están unidos a una fuente y los que no tienen tributarios, son definidos como de primer orden. 2. Cuando se unen dos corrientes de orden n , crean una corriente de orden $n+1$. 3. Cuando dos corrientes de orden diferente se unen, el orden de la corriente aguas abajo es el máximo orden de las corrientes que la preceden.
- *Knickpoints*: Este término *knickpoint* se utiliza comúnmente en geomorfología, para denominar aquellas rupturas bruscas de la pendiente del lecho de un río a lo largo de su perfil longitudinal. Los avances en geomorfología fluvial y evolución del paisaje indican que los *knickpoints* resultan de distintos procesos tectónicos, climáticos y geomorfológicos (Castillo y Lugo-Hubp, 2011; Whipple *et al.*, 2013).
- *Stream power*: Es una función directa entre el caudal de descarga y la pendiente del terreno y es un parámetro importante para determinar la evolución de los canales de un río

(Latrubesse, 2008). El *specific stream power* (SSP) se obtiene dividiendo en *stream power* en el área transversal del canal y representa la cantidad de trabajo que debe hacer un río con un caudal determinado. El SSP del Río Magdalena en el VSM es 200 W/m^2 presentando un pico de 400 W/m^2 a la altura de Honda debido a un estrechamiento local del valle, mientras que en el VIM es de 40 W/m^2 , que es un valor típico de ríos anastomosados (Nardini *et al.*, 2020).

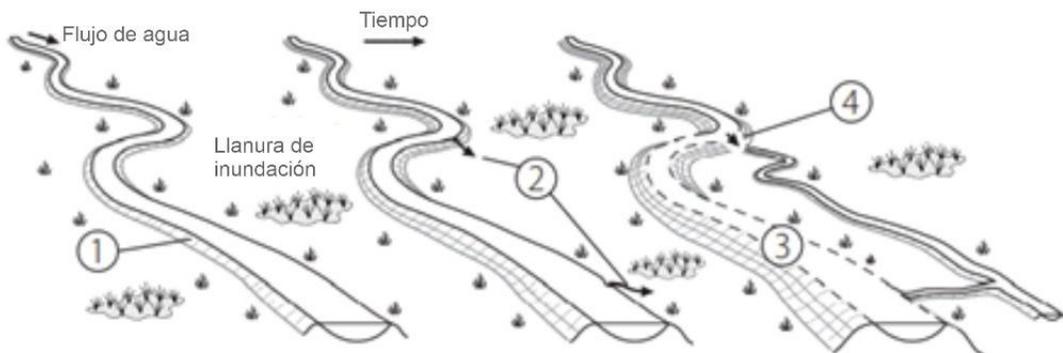
1.4 Generación de los ríos anastomosados

En 1974 Tanner propuso que los canales inusuales del Río Magdalena y sus ciénagas pueden ser ocasionados por la deformación tectónica del Mioceno-Holoceno, particularmente en la Cordillera Oriental, sugiriendo una estrecha relación entre las fallas geológicas del VMM y el VSM con las tasas de hundimiento de la cuenca, las tasas de sedimentación y el comportamiento del río. Posteriormente en 1980, Smith y Putnam sugirieron que el hundimiento en cuencas antepaís o el aumento del nivel del mar en algunas depresiones intracratónicas son claves en la generación de sistemas anastomosados.

En 1996, Nanson y Knighton propusieron que los ríos anastomosados se definen como sistemas de múltiples canales caracterizados por islas aluviales estables que dividen el flujo, posteriormente Makaske (2001) describió que la anastomosis es la coexistencia de canales interconectados, que pueden ser ríos rectos, meándricos o trenzados, estos canales rodean la llanura de inundación y cuando vuelven a unirse al canal principal corriente abajo, se forman islas alargadas y aplanadas, conformadas por porciones aisladas de la llanura aluvial, cuyos sedimentos finos generan bancos cohesivos que resisten la erosión, Makaske en 2001 también estableció que el equilibrio de los ríos anastomosados se alcanza por la relación entre la tasa de creación de canales y abandono de canales. Kleinhans *et al.* (2012) propuso que el confinamiento de un río, la cohesión de la llanura de inundación, la agradación y la avulsión son factores que controlan la bifurcación y finalmente, Morón-Polanco (2016) sugirió un modelo de formación de ríos anastomosados sujeto al crecimiento de barras aluviales y subsecuente bifurcación que conduce a la aparición de canales profundos y estables, también propuso que la configuración de la forma de planta del río es un parámetro clave porque brinda el espacio necesario para permitir el alargamiento de los canales.

La reubicación de canales o avulsión es el proceso natural por el que el flujo de agua se desvía de un canal estable y genera un nuevo curso en la adyacente llanura de inundación (Makaske, 2001; Slingerland y Smith, 2004), de acuerdo con BSG (2014) para la generación de una avulsión, el nivel del agua en un canal se incrementa hasta que alcanza la llanura de inundación que lo rodea, luego se produce un desborde de agua, que puede ser local, hacia la llanura de inundación, posteriormente puede suceder que el canal anterior, cuya altura es mayor al punto por donde el agua se está desbordando, sea abandonado gradualmente hasta que se configura un nuevo canal desarrollado a partir del punto de la avulsión, sin embargo también puede ocurrir que los dos canales coexistan, como se indica en la **Figura 1-4**.

Figura 1-4: Proceso de generación de una avulsión

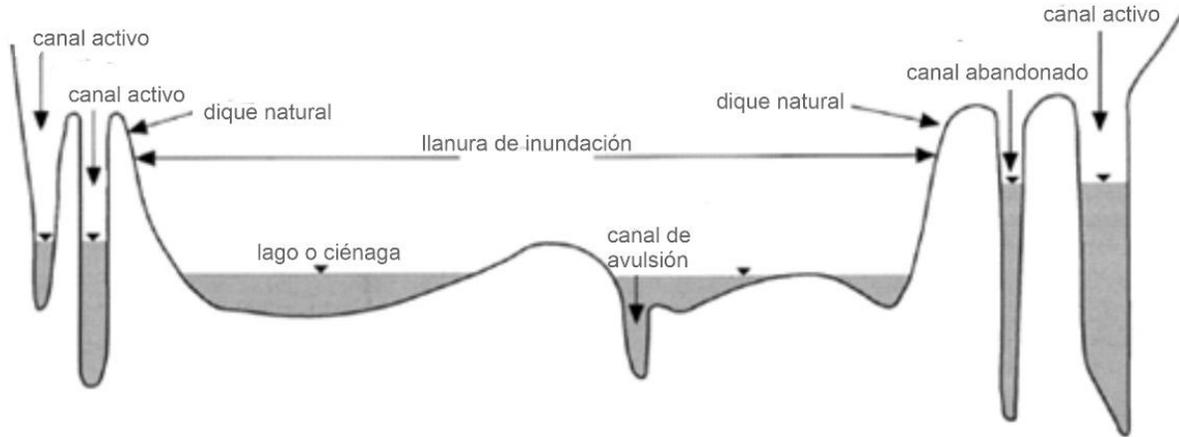


Fuente: Tomado y modificado de BSG (2014).

Teniendo en cuenta que el proceso de avulsiones es clave en la configuración de los sistemas anastomosados, la **Figura 1-5** corresponde al perfil topográfico que Makaske (2001) propuso para explicar las facies de un río anastomosado.

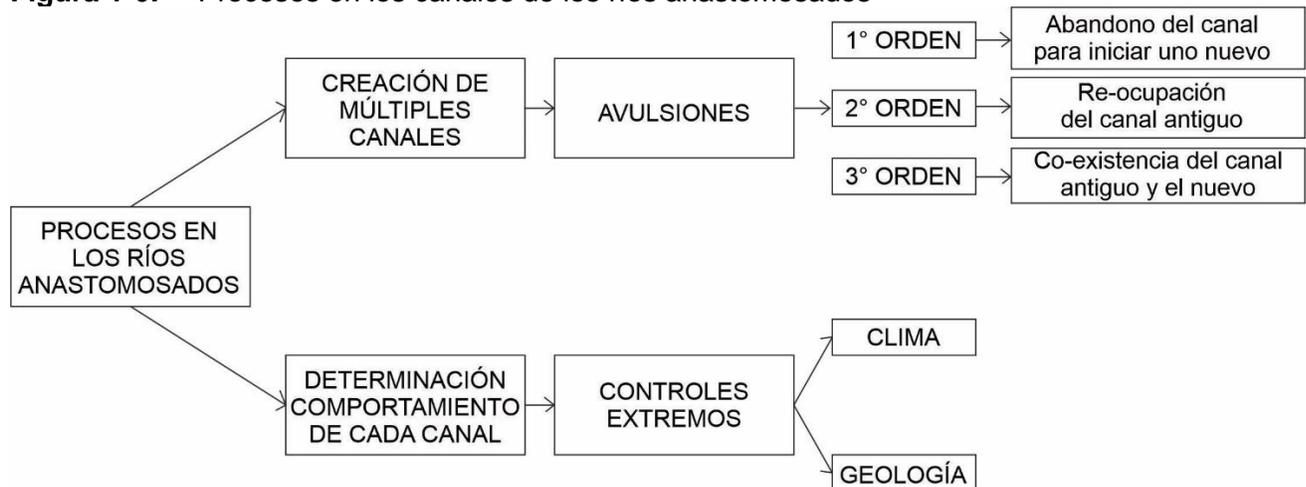
Makaske (2001) también propuso que los procesos geomorfológicos en los ríos anastomosados son de dos tipos: A. Los procesos que crean el patrón de múltiples canales, es decir, los procesos asociados con la avulsión, y B. Los procesos que determinan la morfología de cada canal individual, dichos procesos se resumen en la **Figura 1-6**.

Figura 1-5: Perfil topográfico de un río anastomosado



Fuente: Tomado y modificado de Makaske (2001).

Figura 1-6: Procesos en los canales de los ríos anastomosados



Fuente: Tomado y modificado de Makaske (2001).

Después de estudiar tres ríos en Canadá, Smith y Putman (1980) propusieron que el siguiente es el proceso que se llevó a cabo para constituir dichos sistemas anastomosados actuales:

1. Sistemas fluviales iniciales tipo ríos trezados en un terreno inclinado, con redes de canales relativamente anchos y poco profundos, separados por barras inestables compuestas por gravas y arenas.
2. Generación de abanicos post deglaciación a lo largo de valles confinados, que elevaron el nivel base de los ríos debido al transporte de volúmenes excesivos de sedimento grueso. En este punto es importante agregar que, el descongelamiento de glaciales en el Pleistoceno suministró altos volúmenes de sedimento a sistemas fluviales en países como China, Reino Unido y Canadá (Wang *et al*, 2005; Makaske *et al*, 2017). Además, la transición a nivel mundial del último máximo glacial produjo una transgresión marina en el Holoceno, que generó ciénagas costeras como el caso de México y Australia (Pye y Rhodes, 1985; Caballero *et al*, 2005), debido a los altos niveles del mar.
3. El sedimento acumulado producto de los abanicos, las orillas cohesivas de la llanura de inundación debido al tamaño de grano (limo) y las raíces fuertes de la vegetación inhibieron la migración de canales.
4. Finalmente, los ríos trezados evolucionaron a ríos anastomosados debido a invasión o cubrimiento de los canales trezados y tienen una zona de transición con barras elongadas.

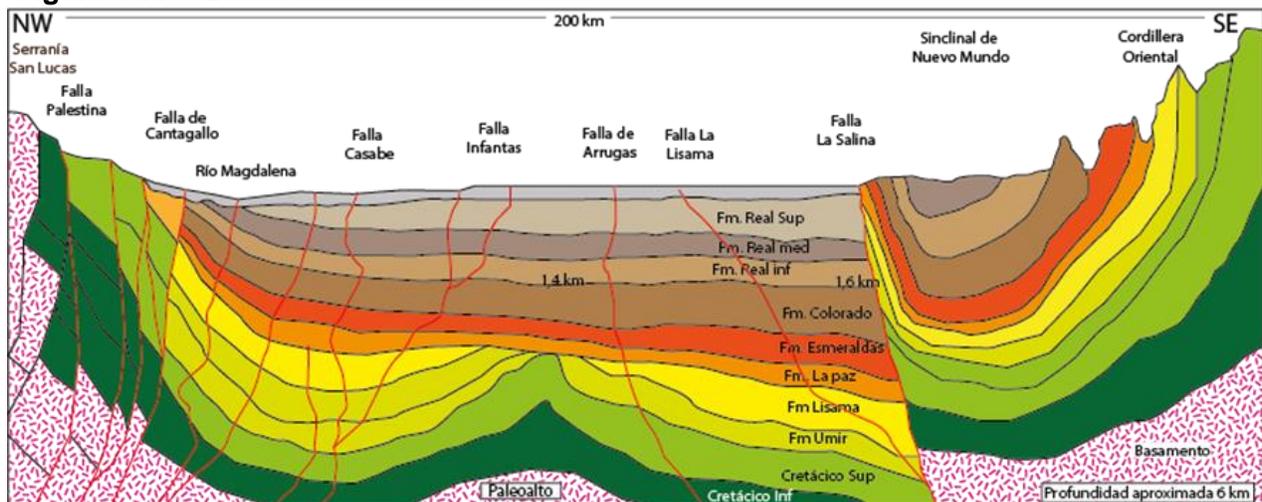
1.5 Contexto geológico

Geológicamente el VMM es una cuenca sedimentaria intramontana, lo que significa que constituye una notable depresión fisiográfica dentro de un relieve montañoso (Rodríguez, 1985), tiene una extensión aproximada de 34.000 km², su límite este es la Cordillera Oriental y su límite oeste es la Cordillera Central; la Falla de Ibagué y el Cinturón Plegado de Girardot la limitan al sur, mientras que el sistema de fallas del Espíritu Santo es su borde norte. Su límite nororiental está definido por el sistema de fallas Santa Marta - Bucaramanga, su límite suroriental corresponde al sistema de fallas Bituima - La Salina y su límite oeste corresponde a la Serranía de San Lucas y a la Falla de Palestina. Finalmente, la Falla de Cimitarra pasa por la parte central de la cuenca del VMM en sentido Suroeste-Noreste y divide esta cuenca en Sector Norte y Sector Sur.

La cuenca VMM está fuertemente influenciada por las placas Nazca, Caribe y Sudamérica, además se ha modificado debido al levantamiento de las cordilleras Central y Oriental, de tal manera que en el área se presentan varios lineamientos y deformaciones asociadas a estas interacciones. Sin embargo, debido a que el río Magdalena ejerce un intenso control sedimentario a lo largo de la cuenca, las estructuras preservadas con muy pocas. La cuenca esta basculada hacia el este y la deformación incrementa hacia el sureste, definiendo así un frente de deformación netamente compresional.

Los estilos estructurales que caracterizan el VMM (**Figura 1-7**) pueden agruparse en tres zonas: 1. La zona oriental: Exhibe estructuras con tendencia NE-SW y se caracteriza por la presencia de fallas inversas de alto ángulo que buzanan hacia al este; 2. La zona occidental: Se caracteriza por la presencia de fallas inversas que buzanan al Oeste y que involucran de manera general rocas desde el Cretácico hasta el Neógeno; 3. La zona central: Presenta fallas inversas con buzamiento al Este. En profundidad se presentan estructuras de tipo dúplex y en menor cantidad, estructuras de inversión heredadas de fallas jurásicas y cretácicas.

Figura 1-7: Estilos estructurales del VMM



Fuente: Tomado de Sarmiento *et al.* (2022).

De acuerdo con Sarmiento *et al.*, 2015 en el AE se presenta un basamento ígneo-metamórfico que corresponde al Neis de San Lucas, suprayacido por una secuencia de areniscas, lodolitas rojas y conglomerados de edad Triásico tardío o infra Jurásico

temprano pertenecientes a la Formación Sudán; y una sucesión de arcillolitas y calizas oscuras con amonitas y bivalvos de la Formación Morrocoyal. Por su parte, la Formación Noreán que se extiende desde la Serranía de San Lucas hasta la Cordillera Oriental, registra un evento volcánico que marca el límite entre el Jurásico temprano y el Jurásico tardío, además es intruida casi singenéticamente por el Granitoide de San Lucas, de edad Jurásico medio.

En el sector suroriente, en el flanco oriental del Sinclinal de Nuevo Mundo, aflora toda la secuencia cretácica y terciaria, compilada por Morales *et al.* (1958). Esta secuencia inicia en el Hauteriviano con la Formación Tambor, que suprayace inconformemente a la Formación Noreán y registra el comienzo de un episodio transgresivo, que da lugar a la depositación de la Formación Rosa Blanca, la Formación Paja, la Formación Tablazo, la Formación Simití, la Formación Calizas del Salto y la Formación La Luna, en un mar somero que progresivamente se profundizó. El tope de La Formación Paja corresponde a una superficie regresiva de escala regional de edad Aptiano tardío, mientras que la Formación La Luna de edad Turoniano representa la máxima profundización de la cuenca. La secuencia cretácica termina con la Formación Umir, de edad Maastrichtiano, cuya composición terrígena está asociada al levantamiento inicial de la Cordillera Central.

La secuencia Cenozoica inicia con la Formación Lisama de edad Paleoceno tardío, que corresponde a la transición de ambientes marinos someros de la Formación Umir, a depósitos deltaicos y de planicies aluviales (Moreno *et al.* 2011, Nie *et al.* 2012). Seguida por ambientes de ríos trenzados de alta energía de la Formación La Paz, hasta ríos meándricos, que varían hacia el norte a llanuras bajas lacustres, afectadas al parecer por influencia marina, de la Formación Esmeraldas. La acumulación y sedimentación de la cuenca, se vio interrumpida al inicio y final del Eoceno, lo que corresponde a las formaciones Mugrosa y Colorado, porque diferentes cambios globales dieron origen a un periodo con altas tasas de erosión en la mayor parte del territorio colombiano. Posteriormente, el Grupo Real de edad Mioceno tardío, representa el restablecimiento de la sedimentación en el marco de una cuenca tipo *foreland*.

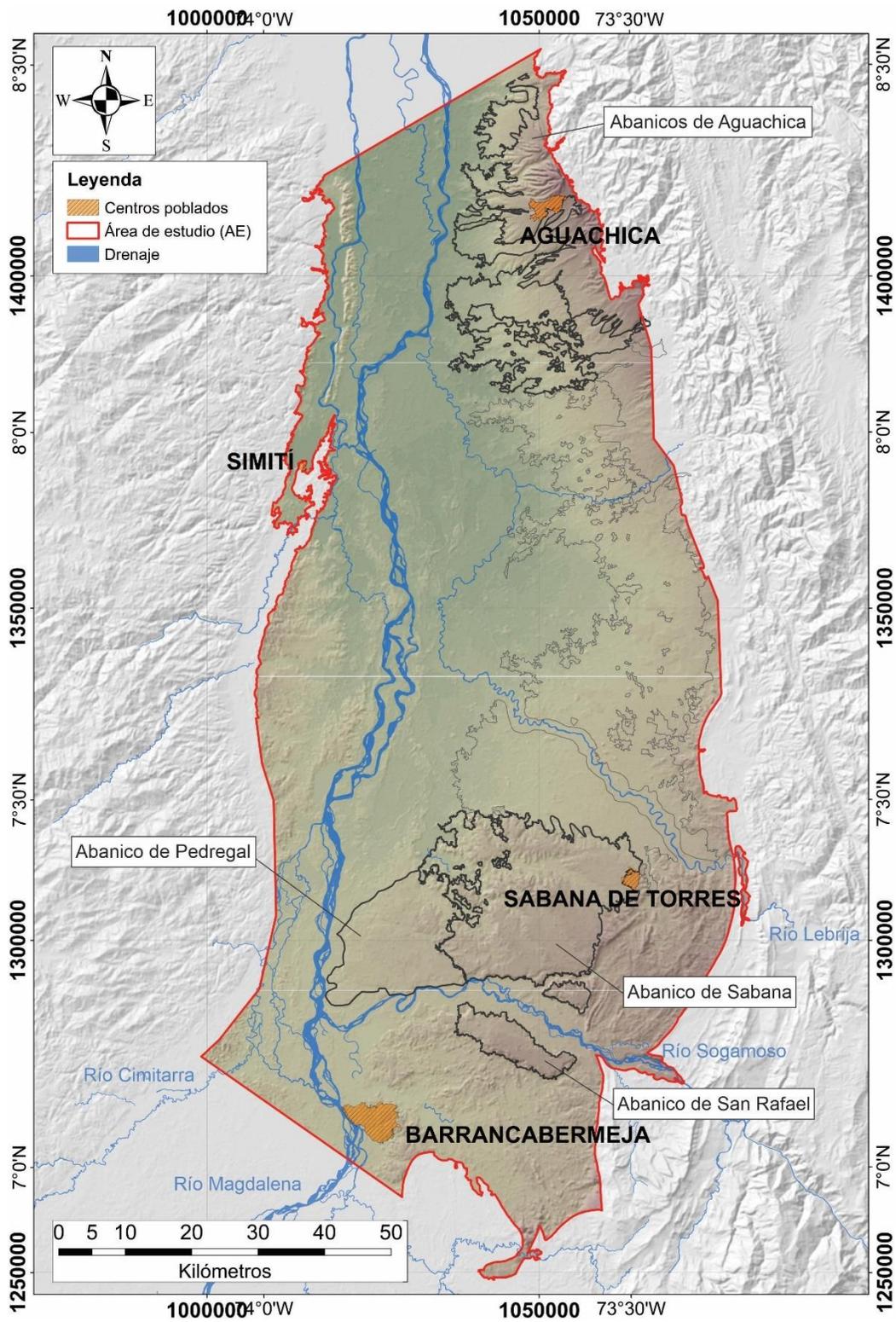
De acuerdo con Jaramillo *et al.* (2015) se tendrían para el Plioceno tasas de sedimentación alrededor de 0,000075 cm/año para, mientras que al inicio del Pleistoceno se han medido tasas de sedimentación entre 0,000138 cm/año hasta 0,000083 cm/año, que son

excesivamente bajas e indican que los materiales cuaternarios han sufrido procesos intensos de erosión con la consabida pérdida de la información. Los depósitos cuaternarios presentes en el AE corresponden a depósitos fluviales, descritos en el **Capítulo 3: Resultados en la sección Unidades y rasgos fluviales** y, a abanicos aluviales. Según Colombo (2010), los abanicos corresponden a depósitos distribuidos radialmente que generan superficies en forma de cono, con laderas cóncavas a convexas y de morfología plana a aterrazada. Su origen está asociado a un cambio de pendiente que ocasiona que una corriente que viene confinada en un sistema montañoso desemboque en una zona plana.

En el AE, los abanicos se localizan al margen occidental de la Cordillera Oriental (Figura 1-8) y de acuerdo a Sarmiento *et al* (2023) por su ubicación geográfica se nombraron Abanicos de Aguachica, compuestos por clastos que miden en promedio de 50 cm y hacia los ápices algunos alcanzan dimensiones mayores a 2 m; Abanico de San Rafael compuesto de clastos entre 15 y 30 cm y Abanico Pedregal compuesto de clastos entre 5 cm y 10 cm. Estos abanicos pueden ser sinorogénicos, es decir que pueden estar asociados a la actividad tectónica de la Cordillera Oriental y ser producto del levantamiento de esta o posorogénicos causados por procesos posteriores al levantamiento. Algunos autores sugieren que el material competente que conforma los abanicos es consecuencia de corrientes torrenciales con grandes descargas y eso puede asociarse a deglaciaciones, ya que según Flórez (2003) durante el Pleistoceno gran parte de la Cordillera Oriental estuvo cubierta con glaciales, por lo tanto, su posterior deglaciación en el Holoceno aportó sedimentos fluvioglaciares al piedemonte y al aumento de las precipitaciones en los Andes centrales y septentrionales, donde los ríos depositaron arena y grava (Sinha *et al.*, 2012).

Es importante resaltar que de acuerdo con (Flórez, 2003) la cuenca del río Sogamoso por su extensión y conexión con una amplia área glacial en el Pleistoceno, que aún se conserva, logró construir un gran abanico en su confluencia con el río Magdalena y que producto de la deglaciación también se encuentran las 693 lagunas ubicadas en los páramos de la Cordillera Oriental que cumplen una función de regulación hídrica.

Figura 1-8: Abanicos presentes en el AE



Fuente: Tomado y modificado de Sarmiento *et al.* (2023).

1.5.1 Condiciones climáticas durante el Holoceno en el AE

A continuación, se presenta información sobre la reconstrucción climática durante el Holoceno a nivel regional y/o del AE, que se recopiló de diferentes investigaciones. El Holoceno es la época actual, que comenzó hace 11700 años aproximadamente después de la última glaciación que a su vez marcó el fin de la época Pleistoceno. A propósito de la última glaciación, en 2015 Solomina *et al* realizó una descripción global de los avances y retrocesos de los para el Holoceno, en la cual encontró una tendencia en el hemisferio norte de aumento del tamaño de los glaciares desde principios del Holoceno medio hasta el Holoceno tardío, mientras que los glaciares en Nueva Zelanda y en los Andes tropicales disminuyeron desde principios del Holoceno hasta el presente, lo que refleja cambios de insolación de baja frecuencia.

En Colombia se tienen registros de sedimentos correspondientes a la llanura de inundación del río Cauca cerca al municipio Victoria en el departamento del Valle del Cauca, que se depositaron antes del último periodo de glacial máximo datados con C14 de 25445 a 25215 años (Cardale de Schrimppff *et al*, 2019) y que sugieren condiciones climáticas con intercalación de períodos secos y húmedos que indican fases de invasión y retirada del bosque. Adicionalmente, Aceituno y Loaiza (2014) indican que cerca al municipio de Santa rosa de Cabal en el departamento de Risaralda, también en la cuenca del río Cauca, se recuperaron sedimentos con edades 8000, 6000 y 3000 años lo que indica que, a pesar de las caídas de ceniza y condiciones climáticas, hubo períodos de tiempo ambientalmente estables en los que el clima ayudó a formar horizontes estables y duraderos. Por otro lado, la información recopilada en 2022 por Gorenstein *et al* confirma que hace 6000 años aproximadamente, en la cuenca del río Amazonas había menos precipitaciones que en la actualidad de manera que era más seca y cálida; mientras que en 2021 Jaramillo *et al* estudió el departamento del Chocó, que es uno de los lugares más húmedos y biodiversos del planeta debido a la presencia de una corriente atmosférica tropical de bajo nivel conocida como Choco low level Jet que transporta la humedad desde el Océano Pacífico hasta la Cordillera Oriental, encontrando que en el periodo entre 6680 y 750 años (C14) hubo periodos de condiciones húmedas, el primero hasta 3710 y el segundo desde 1200, con un intervalo seco que los separa.

Los estudios más cercanos al AE que contienen hallazgos climáticos del Holoceno se enfocan en la Cordillera Oriental, iniciando con Van der Hammen quién en el 2003 hizo un análisis de palinología a un núcleo de perforación en el lago Fúquene que comprende edades C14 que van desde 44100 hasta 8920 y encontró 2 episodios de frío intercalados con 2 episodios de calor, lo que coincide con las observaciones de Vélez et al, quien en el 2006 evidenció que el lago Fúquene registra condiciones secas y frías durante el Pleistoceno tardío (19.700 y 14.200 C14), seguido por el intervalo cálido Interstadial de Guantiva, posteriormente condiciones muy húmedas para el Holoceno medio temprano (desde 8680 C14) y condiciones secas durante el Holoceno tardío medio (desde 3700 C14).

Por su parte, Gómez *et al* (2006) identificó siete períodos de condiciones ambientales en el Pantano de Vargas comprendidos entre 8800 a 2610 C14 en los que se evidencia la transformación gradual de lago a pantano con un incremento en los sedimentos, lo que sugiere un aumento de temperatura. Gómez *et al* (2006) y sus referencias, también indica que el río Chicamocha, afluente del río Magdalena, era un sistema de drenaje dinámico y de alta energía en 8800 C14 ca, pero su caudal disminuyó posiblemente debido a un período de aridez en el Holoceno medio (alrededor 4000 C14) que al parecer redujo el flujo del río y que también afectó la Sábana de Bogotá y la cuenca de Duitama.

Sin embargo, Cardozo *et al* (2014) infirió un periodo de alto nivel lacustre en el lago Tota desde 4000 a 3620 años, que según sus referencias también se registró en el Páramo de Frontino y otros sitios en Colombia. Por su parte, Benfield et al en 2021 con su registro combinado de sedimentos y microfósiles encontró que durante los últimos 4300 años la Sierra Nevada del Cocuy muestra períodos de inundación que se interrumpen por sequías y temperaturas más altas que se presentan en los últimos 2000 a 700 años, coincidiendo con Cardozo *et al* (2014) que encontró que el nivel más bajo del lago de Tota en el Holoceno se alcanzó en el periodo entre el 3046-2445 cal. Finalmente, en 2021 López enunció que el sistema fluvial en el Valle Inferior del Magdalena desde 10010 a 9370 años era de alta energía, pero hace 9370 a 8430 años las condiciones climáticas se hicieron más cálidas y los cambios en la precipitación estacional favorecieron la expansión del bosque, sin embargo, desde hace 4900 se han presentaron inundaciones frecuentes lo que sugiere alta precipitación en toda la cuenca del río Magdalena.

En los estudios anteriormente nombrados se utilizaron diferentes técnicas para reconstruir las condiciones ambientales durante periodos de tiempo en ciertas áreas relacionadas con el AE de esta investigación y a partir de los hallazgos encontrados en la compilación acá presentada se puede interpretar que, durante el Holoceno se han desarrollado variaciones climáticas que tienden al aumento de la temperatura, con intercalación de periodos más fríos y húmedos, de modo muy similar al actual. Vélez *et al* (2006) expuso que las condiciones climáticas inferidas en el Lago de Fúquene durante el inicio del Holoceno son similares a las registradas en algunas zonas en Panamá y Venezuela.

Por otro lado, de acuerdo con López (2021) y sus referencias, la distribución de los principales ecosistemas en los Andes tropicales ha cambiado repetidamente debido a oscilaciones climáticas; lo que concuerda con Benfield *et al* (2021) quien sugirió que las temperaturas más altas hace 2000 años son probablemente resultado de una mayor actividad ENSO, por su parte Cardozo *et al* (2014) propuso que el aumento en la precipitación durante el Holoceno medio a tardío en varias regiones tropicales de América del Sur es un fenómeno relacionado al Monzón Sudamericano (SAM), así como el desplazamiento hacia el sur de la Zona de convergencia intertropical (ZCIT) que en el periodo transcurrido hace 4300 y 3700 años favoreció el aumento de la intensidad de los vientos alisios, lo que a su vez aumentó la transferencia de vapor de agua y la precipitación. Finalmente, Jaramillo *et al* identificó el inicio de ENSO en el Holoceno y de condiciones similares al fenómeno actual de El Niño en el Pacífico tropical que fueron afectadas por las fluctuaciones en la posición de la ITCZ. De esta recopilación se puede concluir que las condiciones climáticas actuales, son muy similares a las que se han tenido durante el Holoceno, con intervalos secos que se intercalan con otros más húmedos, sin embargo, se evidencia un aumento gradual de temperatura durante toda la época geológica.

2. Metodología

Con el fin de entender cómo ha sido la evolución de la morfodinámica del sistema fluvial del río Magdalena, este trabajo se dividió en 4 fases (**Figura 2-1**), en las que se evaluaron e interpretaron imágenes satelitales, se generaron algoritmos para construir diversos mapas y se realizó un análisis geológico y geomorfológico basado en observaciones de campo en el AE.

2.1 Fase I: Mapa multitemporal

En la Fase I de este trabajo se utilizó la plataforma *Google Earth Engine* (GEE), en la que se buscaron imágenes satelitales de las misiones Landsat y Sentinel pertenecientes al AE. Las misiones Landsat, gestionadas conjuntamente por la NASA y el USGS iniciaron en 1972 con el satélite Landsat 4 y se mantienen con el satélite Landsat 8, actualmente en órbita, de manera que representan un archivo histórico de gran cobertura y duración, lo que se traduce en millones de imágenes utilizables. Por cobertura y disponibilidad en el AE, para este trabajo se utilizaron los programas de la siguiente manera: Landsat 5 desde el año 1985 al año 1999, Landsat 7 desde el año 2000 al año 2013 y Landsat 8 desde año 2014 al año 2020, en los documentos ANEXOS (**ANEXO D**) se compilan las especificaciones de las misiones Landsat utilizadas. Por otro lado, de acuerdo con Thissen (2019) para un delineado más preciso de la cobertura de agua, lo ideal es que las imágenes satelitales tengan un contenido de nubes menor o igual al 15%, de manera que el gran contenido de nubes presente en las imágenes correspondientes a los años 1993, 1994 y 1995 no permitió su uso en esta investigación. Cuando una imagen es captada por un sensor espacial se ve modificada tanto por el comportamiento de la atmósfera, como por el ángulo de observación. Para su corrección se utiliza el ángulo solar del centro de la escena en el instante de la captura (IGAC, 2013), en GEE se encuentran colecciones de

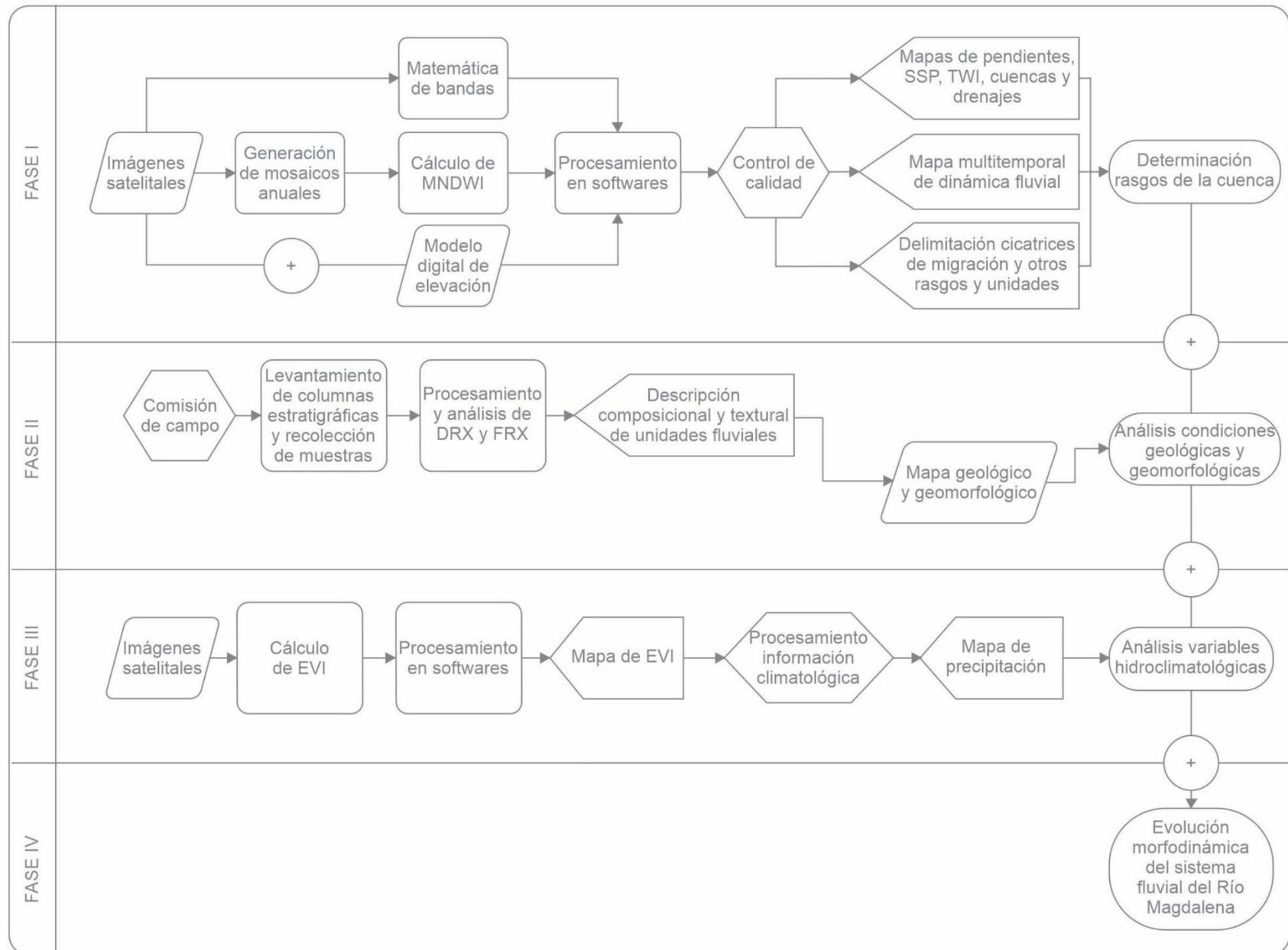
imágenes que contienen la reflectancia de la superficie corregida al nivel TOA y superficie corregida al nivel TOA y al nivel SR, de manera que no fue necesario hacer ningún proceso adicional para lograr esta corrección. En esta investigación se utilizaron las imágenes TOA ya que según Donchyts *et al.* (2016) para la detección de agua, el uso de TOA puede resultar mejor, especialmente cuando se trabaja con productos satelitales de misiones múltiples.

Para la elaboración del mapa multitemporal de dinámica fluvial (**ANEXO E**) se utilizó el índice de diferencia de agua normalizada modificada (MNDWI) propuesto por Xu Hanqiu en 2006 que utiliza la banda verde y la banda infrarroja de onda corta (SWIR) para discriminar la cobertura de agua de otras coberturas y así delinear los cuerpos de agua superficial en las imágenes satelitales de cada año. De acuerdo con Thissen (2019) el MNDWI fue ampliamente aceptado como el índice más estable y confiable, debido al hecho de que la SWIR es capaz de reflejar características más sutiles del agua en comparación con la banda de infrarrojo cercano (NIR), utilizada en el Índice de diferencia de agua normalizado (NDWI).

Por otro lado, las misiones Sentinel hacen parte del programa Copernicus de la Unión Europea e iniciaron en 2014 con el satélite Sentinel-1, en este trabajo se utilizaron imágenes de Sentinel 1 y 2 en el control de calidad de los MNDWI previo al completamiento del mapa multitemporal de dinámica fluvial, porque tienen una mejor resolución que las imágenes Landsat.

En la fase I de esta investigación también se generaron mapas de *specific stream power* (SSP), explicado en el **Capítulo 1: Aspectos teóricos en la sección Dinámica fluvial**, y de *topographic wetness index* (TWI) que de acuerdo con Carson y Kirkby (2009) modela la dinámica de los flujos superficiales y subsuperficiales basado en el control topográfico del escurrimiento (Alcántara-Ayala, 2000), de manera que se pueden identificar los sectores propensos a acumulación de agua superficial mediante concentración del escurrimiento. Los mapas de SSP y TWI se generaron mediante matemática de bandas de las imágenes satelitales, cuyas ecuaciones se indican en la **Figura 2-1**, en combinación con el modelo digital de elevación (DEM) de 30 metros de resolución derivado de la misión *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) de la NASA.

Figura 2 - 1: Diagrama de procesos de la metodología empleada.



Para facilitar la interpretación y el análisis, los valores de SSP y TWI se normalizaron. Por su parte, los mapas de pendientes, relieve del terreno, drenajes y cuencas hidrográficas, todos **ANEXOS F a J**, se obtuvieron a partir de SRTM, siguiendo la metodología descrita por Bajjali (2018), a partir de la cual se extrajeron la dirección de flujo, la acumulación de flujo y el área de captación; como parte del control de calidad, los drenajes obtenidos se compararon con los drenajes de nivel 8 de HydroBASINS (2014), que es un producto realizado por la WWF en colaboración con el proyecto EU Biofresh y IUCN y, con los drenajes de la cartografía oficial del IGAC.

Tabla 2-1: Ecuaciones MNDWI, SSP y TWI

Índice	Nombre	Ecuación	Breve explicación
MNDWI	<i>Modified Normalized Difference Water Index</i>	$\frac{\text{Banda verde} - \text{SWIR 1}}{\text{Banda verde} + \text{SWIR 1}}$ (2-1)	Diferencia cobertura superficial de agua de otras coberturas
SSP	<i>Specific Stream Power</i>	$\frac{\rho g Q \beta}{w}$ (2-2)	Representa la cantidad de trabajo que hace un río y provee una estimación de la capacidad de carga
TWI	<i>Topographic Wetness Index</i>	$\ln \frac{\alpha}{\tan \beta}$ (2-3)	Permite identificar los potenciales lugares donde se concentra la humedad

Fuente: Información recopilada de Xu, Hanqiu. (2006); Carson, M. A, Kirkby, M. J. (2009); USDA (2020); Bajjali, W. (2018).

Finalmente, la identificación, clasificación y caracterización de rasgos y unidades fluviales presentes en el AE, se realizó mediante la inspección visual de diferentes componentes de morfodinámica y geodinámica fluvial utilizando insumos derivados de sensores remotos que luego fueron confrontados con información identificada en las visitas de campo y de insumos LEH-UN (2005).

2.2 Fase II: Comisión de campo

La Fase II inició con una visita a campo para hacer control de calidad de las unidades y rasgos identificados en la Fase I y para entender las relaciones geológicas y geomorfológicas con el sistema fluvial. Los puntos visitados fueron determinados en el trabajo con imágenes satelitales en la Fase I. La escala de trabajo en campo fue 1:10.000, se levantaron 15 columnas estratigráficas y se tomaron muestras en cada una para análisis difracción de rayos-X (DRX) y fluorescencia de rayos-X (FRX) de los depósitos fluviales, además se visitaron los abanicos del AE para entender su distribución e influencia en la evolución de la dinámica fluvial.

En el levantamiento de las columnas estratigráficas se utilizó bastón de Jacob, cinta métrica y brújula Brunton, para la descripción del tamaño de las capas y láminas se siguió la metodología establecida por Campbell (1957). Las muestras se tomaron de acuerdo con la litología predominante y el análisis de DRX y FRX se hizo en el Laboratorio de Litogeoquímica del Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia, donde se siguió la metodología propuesta por Thorez (1996) y se utilizó un difractor Bruker D2 PHASER, un equipo BRUKER Tracer GeoQuant IV y el *software* Diffract.EVA.

La información recolectada en campo fue comparada con el mapa geológico del SGC (2020), los mapas geológico y geomorfológico del AE publicados respectivamente en Sarmiento *et al.* (2022 y 2023) y con las unidades geomorfológicas del IDEAM (2010) como parte del control de calidad para posteriormente analizar la influencia de las condiciones geológicas y geomorfológicas en la dinámica fluvial del río Magdalena en la zona de estudio descritas en el **Capítulo 3: Resultados en la sección Componente espacial de la dinámica fluvial.**

2.3 Fase III: Variables hidro-climatológicas

En la Fase III se generaron los mapas de *Enhanced Vegetation Index* (EVI) y de precipitación. El EVI permite monitorizar el estado de la vegetación en lugares con altas densidades de biomasa y efectos topográficos mínimos (ESRI, 2022), condiciones presentes en el AE, el EVI se calcula mediante matemática de bandas (**Ecuación 2-4**) y

por facilidad en el análisis, se normalizaron sus valores. En esta investigación se utilizó el EVI para entender movimientos del sistema fluvial, según el estado de la cobertura de vegetación y junto con el mapa de precipitación, para analizar las relaciones del ciclo hidrológico como precipitación, escorrentía, infiltración e inundación con el sistema fluvial.

$$EVI = \frac{2,5 (NIR - \text{Banda roja})}{(NIR + (6 * \text{Banda roja}) - (7,5 * \text{Banda azul}) + 1)} \quad (2-4)$$

Para generar el mapa de precipitación se descargaron los valores de las medidas de precipitación promedio anual desde el año 1981 hasta el año 2010 en las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM (2021) que abarcan las cuencas hídricas delimitadas en la Fase I, posteriormente esta información se procesó en ArcGIS® y como parte del control de calidad se comparó el mapa de precipitación generado con información del satélite TRMM de la NASA (2021). Además, se calcularon las áreas de los cuerpos de agua superficial para cada año del mapa multitemporal elaborado en la Fase I y se compararon con los valores de ONI, explicado en el **Capítulo 1: Aspectos teóricos en la sección Fenómenos del Niño y la Niña**, obtenidos de la NOAA (2021), con el fin de entender la relación de las variables hidro-climatológicas con la dinámica fluvial del río Magdalena en la zona de estudio descritas en el **Capítulo 3: Resultados en la sección Componente temporal de la dinámica fluvial**.

2.4 Fase IV: Control de calidad

En la Fase IV se hizo un control de calidad de toda la información generada en las anteriores fases y se evaluaron, interpretaron y analizaron en conjunto todos los productos obtenidos para entender la evolución de la dinámica fluvial del río Magdalena en el área de estudio.

3. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos con esta investigación, iniciando con la descripción de las unidades y los rasgos fluviales más relevantes presentes en el área de estudio (AE), que definen el sistema fluvial y su funcionamiento, posteriormente se abordan los componentes espacial y temporal del sistema fluvial del Río Magdalena, para comprender la influencia de las condiciones geológicas y geomorfológicas en su morfodinámica. Finalmente, se detalla la relación de las variables hidro-climatológicas en el sistema fluvial del río Magdalena en el AE.

3.1 Unidades y rasgos fluviales

Las unidades fluviales más relevantes presentes en el AE corresponden a diferentes cuerpos con morfologías distintivas y cuyos materiales dependerán de su origen. Estas unidades se dividen en cuatro grupos como se indica en la sección **Tabla 3-1** y de acuerdo con el **Capítulo 2: Metodología sección Fase I**, para su respectiva identificación se trabajó con imágenes satelitales mediante cálculo de índices e inspección visual, luego se realizó un control de calidad en campo y se finalizó con la interpretación y el análisis de estas unidades. Las unidades fluviales presentadas acá, están basadas en las unidades geomorfológicas de Sarmiento *et al.* (2023) y del IDEAM (2010), haciendo énfasis en aquellas relacionadas con la dinámica fluvial, mientras que, los rasgos geomorfológicos identificados están basados en LEH-UN (2005) y describen el funcionamiento del sistema fluvial actual del río Magdalena entre las poblaciones de Barrancabermeja, Santander y Aguachica, Cesar.

Tabla 3-1: Unidades y rasgos fluviales

Grupo	Unidades
Cuerpos de agua superficial:	Canales activos, lagunas y ciénagas.
Depósitos:	Barras de sedimento, diques naturales, llanuras de inundación, <i>crevasse splays</i> ,
Divagación:	Cauces y meandros abandonados, paleocauces.
Rasgos:	Talud de socavación, Cicatrices de migración, chorros de desborde, límite cubetas de inundación.

Fuente: Elaboración propia.

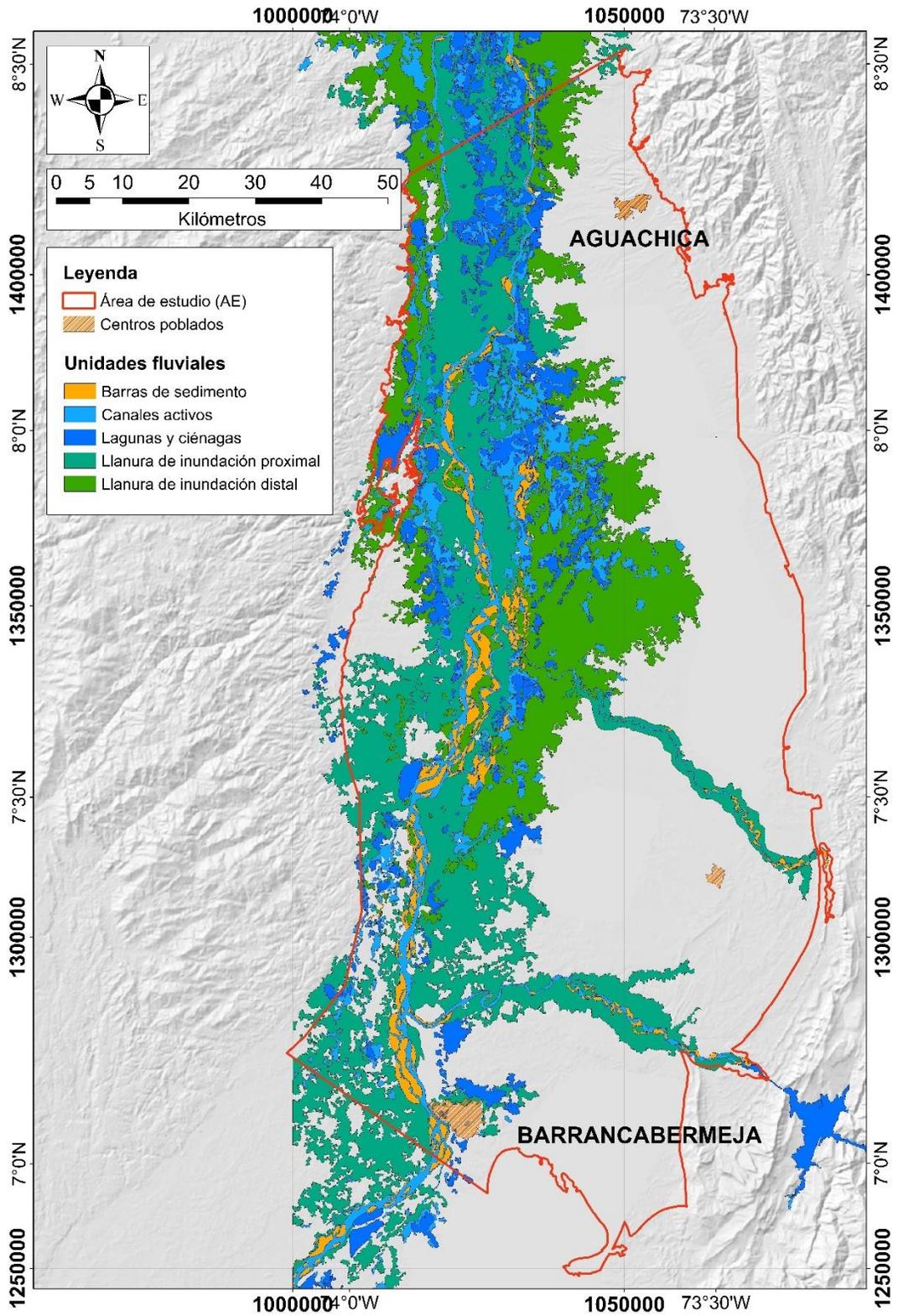
A continuación, se describen las unidades más relevantes dentro del AE, cuya distribución en el área de estudio se puede apreciar en la **Figura 3-1**.

3.1.1 Unidades de agua superficial

▪ Canales activos (ANEXO N)

Corresponden a los cursos de agua perennes de los diferentes ríos presentes en el área de estudio, como lo son el río Magdalena, el río Sogamoso, el río Cimitarra y el río Lebrija, entre otros, junto con sus respectivos brazos y quebradas afluentes. Los canales activos transportan agua y sedimentos, cuyas cantidades dependerán de la magnitud del caudal. El análisis e identificación de estos canales se realizó mediante los índices TWI y SSP, previamente descritos en el **Capítulo 2: Metodología en la sección Fase I**, cuyos valores están muy cercanos a 1 y a 0, respectivamente. La altura a la que se encuentra el Río Magdalena al ingresar al área de estudio es 70 msnm y al salir es 35 msnm (según valores del DEM), la forma del terreno circundante en toda el área es plana a suavemente ondulada, con pendientes entre 0° y 5°, en términos generales el río recorre un relieve suavemente cóncavo, adicionalmente, los índices de vegetación circundante a los canales es determinado por medio del EVI (previamente descrito en el **Capítulo 2: Metodología en la sección Fase III: Variables hidro-climatológicas** que mantiene un valor promedio de 0,8, este valor es alto en toda el AE (ANEXO K).

Figura 3-1: Unidades fluviales



Fuente: Elaboración propia.

- **Lagunas y ciénagas (ANEXO O)**

Corresponden a cuerpos de agua superficial quieta, ya sea perenne o estacional. Pueden alcanzar hasta 10,5 km de ancho y 5,7 km de largo, se ubican en su mayoría en la zona inundable del río y algunas tienen conexión con el río. Al igual que en los canales activos, los valores de SSP son muy cercanos a 0, mientras que los de TWI están por encima de 0,8. La forma del terreno circundante a las ciénagas y lagos es plana a suavemente ondulada, con pendientes entre 0° y 5°, y los valores del EVI circundante son en promedio de 0,6 (ANEXOS I a K).

3.1.2 Unidades de depósitos

- **Barras de sedimentos (ANEXO P)**

Se encuentran dentro de los cauces activos y dependiendo del tipo de río, en el AE se reconocen barras longitudinales y barras de punta. Alcanzan hasta 2 km de ancho y 10 km de largo.

- **Dique natural (ANEXO Q)**

Estructura en forma de cresta o banda alargada y estrecha, asimétrica, con pendiente acentuada hacia el cauce, compuesta de arena muy fina, arena muy fina limosa y/o limo, de 1 a 2 m de alto y 3 a 4 m de ancho, localizada en las riberas de los cauces activos.

- **Llanura de inundación proximal (ANEXOS R)**

Superficie de morfología plana y eventualmente inundable; en el AE se presentan inundaciones bianuales debido al régimen de precipitación. Las llanuras de inundación se ubican alrededor de los cauces activos de los principales ríos del área de estudio (Magdalena, Sogamoso, Lebrija, Cimitarra y brazos del Magdalena) y en algunas zonas adyacentes a los sistemas cenagosos, corresponde al área de divagación de los cauces

activos y al lugar donde se estanca el agua a manera de lagunas, ciénagas, canales abandonados o cubetas de inundación. Están conformadas por los sedimentos transportados en suspensión y acumulados por decantación.

Su topografía es casi plana a suavemente ondulada con inclinaciones entre 0° y 5°, en términos generales el relieve es suavemente cóncavo, los valores de TWI están entre 0,5 y 0,8 mientras que los valores de SSP entre 0,2 y 0,3 y el EVI es en promedio de 0,8 **(ANEXOS I a K)**. En las comisiones de campo se levantaron columnas estratigráficas de algunas unidades incluidas la llanura de inundación proximal **(ANEXOS R)**.

- **Llanura de inundación distal (ANEXO T)**

Superficie plana a suavemente inclinada con pendientes de 3° a 5° y morfología ondulada, disectada, suavemente basculada, su elevación máxima es de 60 msnm, se extiende por cientos de kilómetros separando las unidades fluviales de los trenes de abanicos aluviales, que se ubican hacia la Cordillera Oriental.

En general, los valores de TWI están entre 0,4 y 0,5 mientras que los valores de SSP están entre 0,2 y 0,3 y el EVI es en promedio de 0,8 **(ANEXOS I a K)**. En las comisiones de campo se levantaron columnas estratigráficas de algunas unidades, entre esas la llanura de inundación distal **(ANEXOS U)**.

- **Crevasse splay (ANEXO V)**

Cuerpos en forma de abanico a partir de un cauce activo y que se extiende hacia la llanura de inundación. Su evolución da como resultado una avulsión del canal donde se origina. Genera un subsecuente escape de agua y la acumulación progresiva de sedimento sobre la llanura de inundación. Los mejores ejemplos se identificaron cerca de San Pablo y Simití.

3.1.3 Unidades de divagación

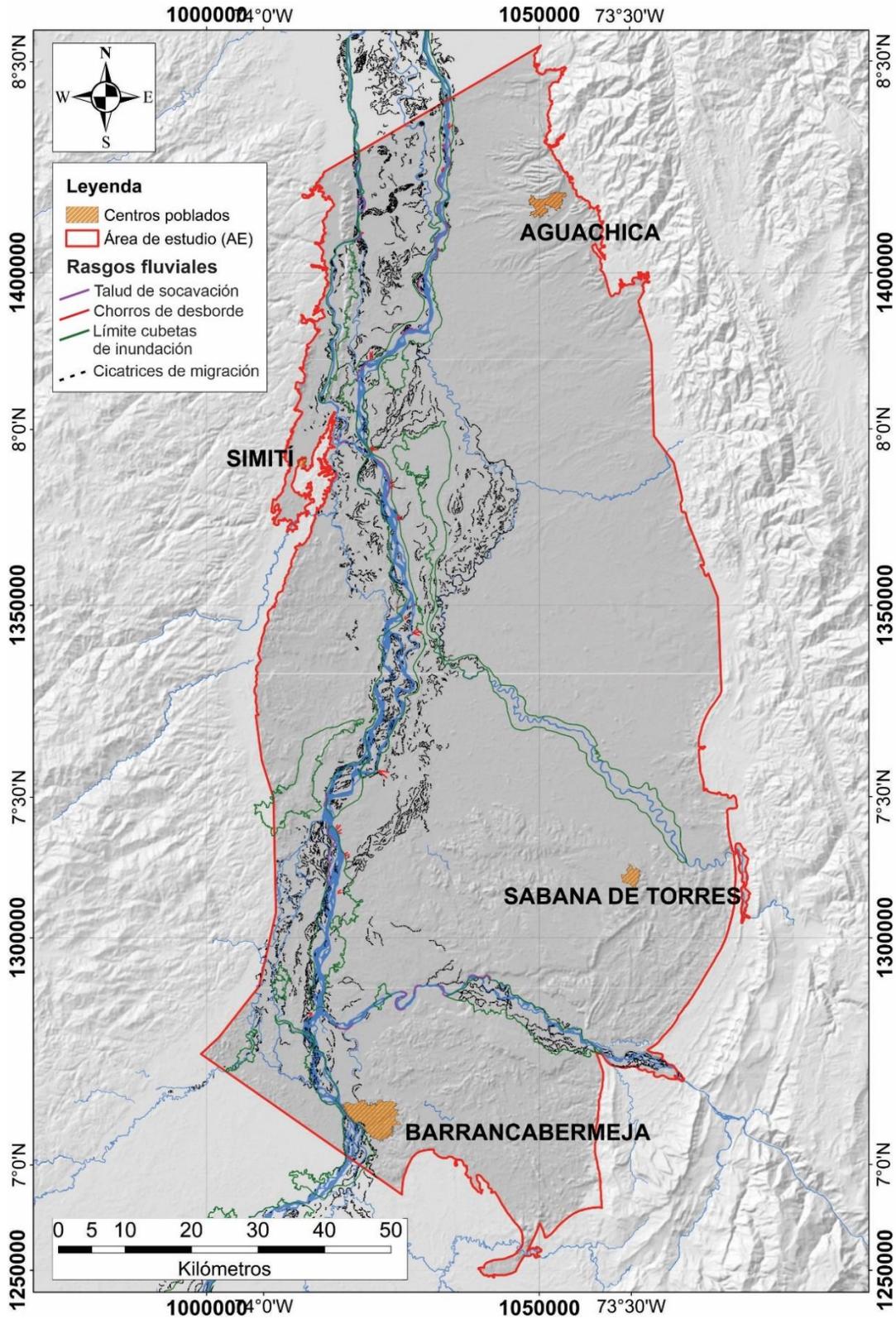
- **Meandros y cauces abandonados (ANEXO W)**

Los meandros y cauces abandonados corresponden a cuerpos de agua que por dinámicas propias de los ríos han quedado abandonados, se encuentran sobre la llanura de inundación o las terrazas de acumulación y pueden conformar un cuerpo de agua aislado, ser paulatinamente colmatado o retomado eventualmente por el río que lo abandonó o por otro río.

3.1.4 Rasgos de la dinámica fluvial

En la **Figura 3-2** se puede apreciar la distribución de los rasgos fluviales más relevantes dentro del AE. Como talud de socavación que corresponde a la superficie que el río erosiona, chorros de desborde que son puntos en los que se podría desarrollar una avulsión, límites de cubeta de inundación que bordean la llanura de inundación y cicatrices de migración y corresponden a rastros de cursos de agua mucho más antiguos de los cauces abandonados, pero identificables.

Figura 3-2: Mapa de rasgos



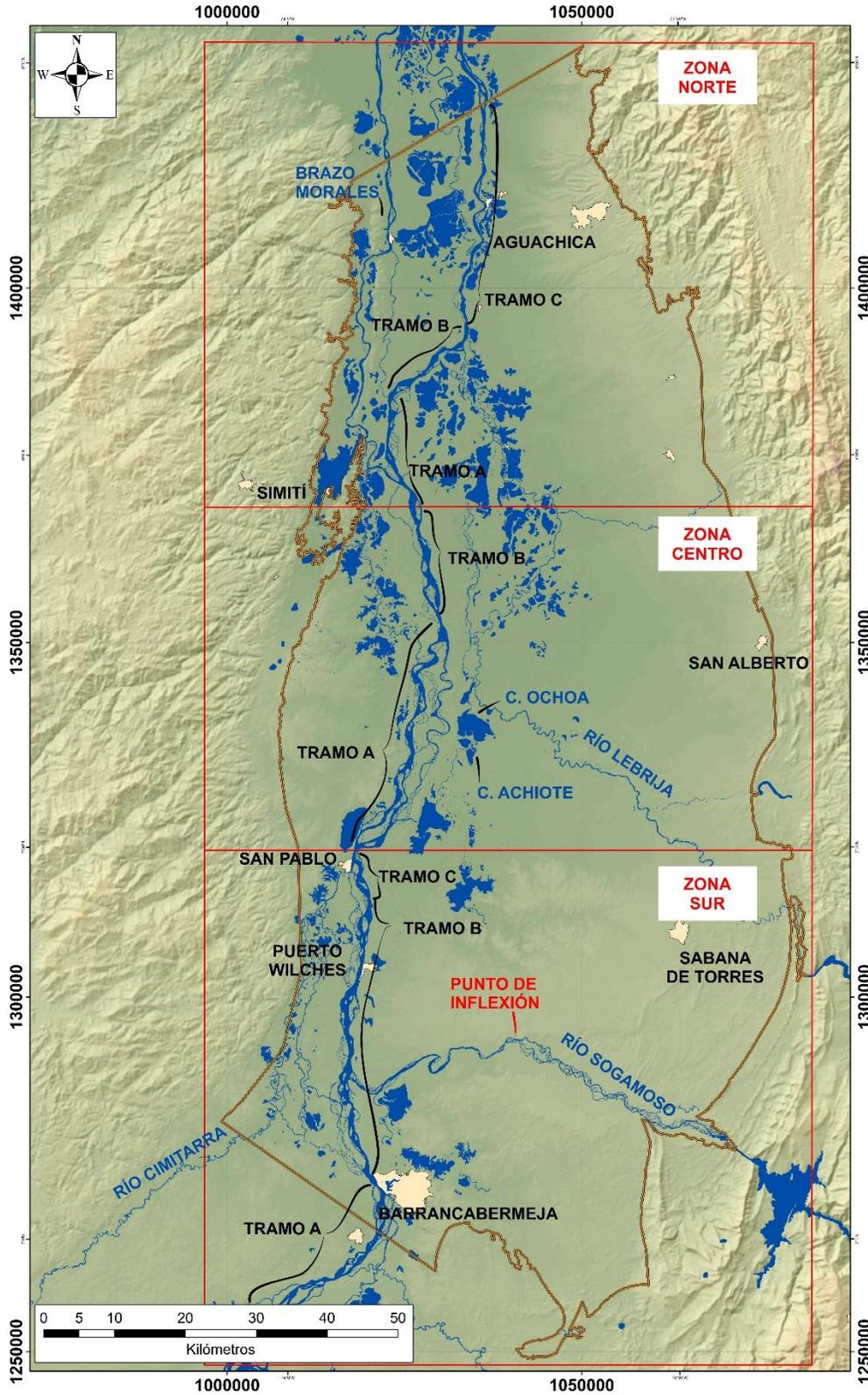
Fuente: Elaboración propia.

3.2 Componente espacial de la dinámica fluvial

Para la interpretación y análisis de la dinámica fluvial del río Magdalena, se dividió el AE en 3 zonas: sur, centro y norte (**Figura 3-3**). La zona sur comprende desde el inicio del AE al sur de Barrancabermeja hasta el municipio de San Pablo y abarca los ríos Sogamoso y Cimitarra, ambos desde su entrada al AE hasta el punto de aforo al Río Magdalena. La zona centro a partir de San Pablo hasta Simití e incluye el río Lebrija; igualmente desde su entrada al AE hasta su desembocadura al río Magdalena. La zona norte va desde el municipio de Simití hasta el borde norte del AE. La división del AE corresponde a cambios observados en el régimen y comportamiento del río Magdalena, tanto el análisis como la interpretación se presentan de sur a norte coincidiendo con el curso del río.

Debido a la escala del AE no se hizo un análisis cuantitativo de la densidad y frecuencia del drenaje, pero cualitativamente se observa que tanto la densidad como la frecuencia es alta, la red de drenaje está bien integrada, es homogénea y consecuente a subsecuente. Algunos cauces se obtienen como consecuencia del desarrollo de pendientes y otros se encuentran con los cauces consecuentes por procesos de erosión tardíos. En general en el valle se observa una red de drenaje adaptada ya que hay una estrecha relación entre la estructura, la litología y la disposición del drenaje, mientras que sobre las laderas de las Cordilleras Oriental y Central se observa una red dendrítica reflejando condiciones geológicas uniformes.

Figura 3-3: Zonas para la interpretación y análisis de la dinámica fluvial



Fuente: Elaboración propia.

3.2.1 Zona sur

En la zona sur se localizan las poblaciones de Barrancabermeja, Puerto Wilches y Sabana de Torres, que pertenecen al departamento de Santander y San Pablo en el departamento de Bolívar. También los últimos tramos de los ríos Sogamoso y Cimitarra, que desembocan en el río Magdalena, que para este trabajo se dividió en los tramos A, B o C, según cambios en su orientación (**Figura 3-3**). A continuación, se describe el comportamiento espacial de cada río.

Antes de entrar al AE, en el Tramo A el río Magdalena se compone de un canal principal que mide aproximadamente 1,5 km de ancho y tiene orientación N45E, dentro del cual se observan barras de sedimento paralelas al canal y con dimensiones superiores a 1 km² (**ANEXO X**).

Una vez el río Magdalena ingresa al AE e inicia el tramo B, gira cerca de 90° al occidente cambiando fuertemente su orientación a N45W, no obstante, el río se dirige gradualmente hacia el norte, de manera que, en la desembocadura del río Sogamoso, tiene una dirección N10E, en este punto el canal se ensancha hasta 4 km aproximadamente y aunque las barras de sedimento se mantienen paralelas al cauce, aumentan su tamaño hasta 3 km de largo por 1 km de ancho. A la altura de Barrancabermeja, se desprenden dos ramificaciones del río Magdalena que se mantienen en dirección N60W por 3 km, para luego girar al N y formar un solo canal que terminará uniéndose al río Cimitarra unos 5 km antes de su desembocadura.

Tanto este canal como el río Cimitarra son paralelos al Río Magdalena, que tiene una orientación S-N desde la desembocadura del río Sogamoso hasta donde termina el tramo B. En dicho tramo el canal principal del río Magdalena se mantiene en 2,4 km de ancho, mientras que las barras de sedimento alcanzan 2 km x 1 km. Finalmente, en el tramo C el río Magdalena tiene una dirección aproximada N30W.

En el **ANEXO X** también se puede apreciar que en el tramo A los canales del río se bifurcan en ángulos agudos y que la forma de las barras es convexa. En este tramo, la relación trenza-canal es mayor que 2, el porcentaje de gradiente es 0.045% y el índice de

sinuosidad es 1,03 (parámetros previamente descritos en el **Capítulo 1: Aspectos teóricos en la sección Dinámica fluvial**).

Como se evidencia en la **Tabla 3-2** dichos parámetros se mantienen similares en los tramos B y C, lo que indica que en la zona sur el Río Magdalena se comporta como un río trezado sinuoso, cuyas unidades fluviales son diques naturales, canales activos, barras de sedimento y lagunas o ciénagas, además como rasgos fluviales se observan cicatrices de migración, la **Figura 3-4** contiene una sección transversal donde se indica la ubicación de estas unidades y rasgos.

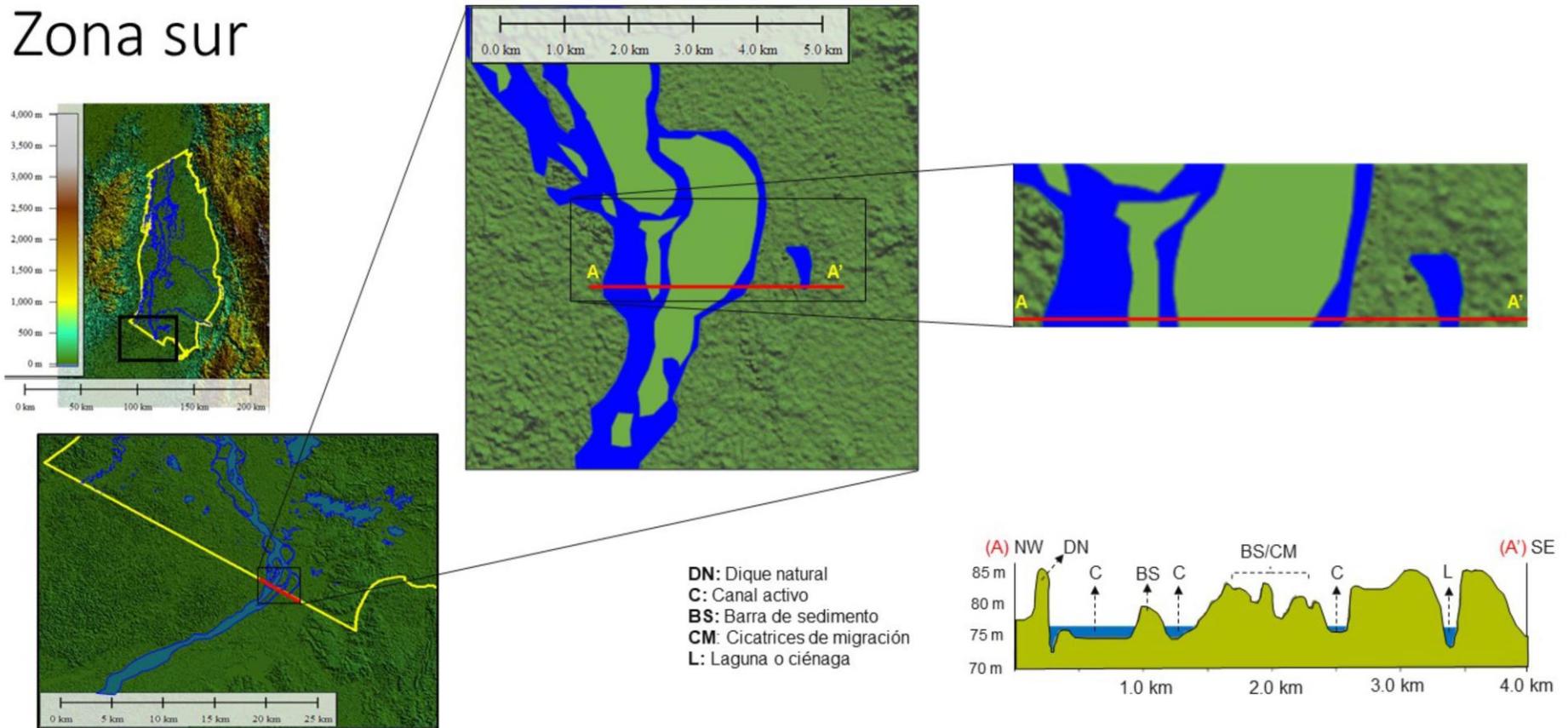
Tabla 3-2: Parámetros del Río Magdalena en los tramos de la zona sur

Tramo	Ángulo de bifurcación	Forma y de las barras	Relación trenza-canal	Disposición de las barras	Gradiente	Índice de sinuosidad
A	~75°	convexa	>2	Longitudinal	0,05%	1,03
B	~50°	convexa	>2	Longitudinal	0,04%	1,15
C	~70°	convexa	>2	Longitudinal	0,04%	1,03

Fuente: Elaboración propia

Figura 3 - 4: Unidades fluviales zona sur

Zona sur



Fuente: Elaboración propia

- **Río Sogamoso**

El río Sogamoso se compone de un canal principal más angosto (1,5 km de ancho) que el río Magdalena, pero que también contiene barras de sedimento paralelas y transversales al canal (0,3 km por 0,6 km), además tiene una dirección N60W que mantiene por aproximadamente 30 km. Después del punto de inflexión, el río Sogamoso cambia su orientación girando al SW y por unos 20 km presenta una dirección promedio S70W, en este segmento el río se hace sinuoso y meándrico como se observa en la **Figura 3-3** hasta volver a tener una dirección N60W cerca de la desembocadura en el río Magdalena. En términos generales el río Sogamoso también se comporta como un río trenzado sinuoso y al interior del AE, la cuenca del Río Sogamoso tiene drenajes hasta de orden 6 según la clasificación de Horton-Strahler (Strahler, 1957), de manera que este río es de orden 7.

- **Río Cimitarra**

La cuenca del río Cimitarra al interior del AE contiene drenajes hasta de orden 6, según la clasificación de Horton-Strahler (Strahler, 1957), de manera que el Río Cimitarra corresponde a un drenaje de orden 7 que, desde su ingreso al AE y hasta el municipio de San Pablo, donde desemboca al Río Magdalena; presenta una orientación casi S-N (**Figura 3-3**). A diferencia de los otros ríos en la zona sur, el Cimitarra se comporta como un río sinuoso que cruza un complejo cenagoso, la mayoría de estas ciénagas presentan una forma elongada paralela al río, sin embargo, las 2 ciénagas que se encuentran antes de San Pablo son irregulares.

Se observa que una vez el río Cimitarra ingresa al AE cambia su comportamiento de cauce sinuoso-meándrico a sistema anastomosado, del cual hacen parte los canales que emergen al Oeste del río Magdalena, cerca de Barrancabermeja conforma un conjunto de canales meándricos interconectados, separados por llanura de inundación; asimismo las cicatrices de migración que se presentan cerca del punto de aforo del río Cimitarra al río Magdalena en San Pablo, además de ser un rastro de divagación de los canales, evidencian la red de canales del sistema anastomosado que construyen los dos ríos. Por su parte, las ciénagas al oriente del río Magdalena son de forma elongada, algunas con orientación SE-NW y otras SW-NE, las ciénagas de mayor tamaño como San Silvestre,

Brava, Llanito, Yarirí y De Paredes tienen bordes más irregulares a comparación de las otras ciénagas de la zona.

3.2.2 Zona centro

En la zona centro se encuentran las poblaciones de San Alberto, Santander y Simití, Bolívar, así como el río Lebrija y el río Magdalena, que para este trabajo se dividió en los tramos A y B, según cambios en su orientación (**Figura 3-3**). A continuación, se describe el comportamiento espacial de cada río.

Al iniciar la zona centro en la población de San Pablo, el río Magdalena se bifurca y se configura en 2 canales que se mantienen en dirección N30E por aproximadamente 30 km, dichos canales están separados por una franja de terreno en forma lenticular que varía entre 0,5 y 4,5 km de ancho y que se aprecia en el **ANEXO Y**, junto con los ángulos de bifurcación de los canales.

El cauce occidental tiene una relación trenza-canal de 2, un gradiente de 0,04%, un índice de sinuosidad de 1,02 y continúa teniendo barras de sedimento, que se describen en la **Tabla 3-3**, todos estos valores indican un carácter trenzado. Por otro lado, el canal oriental es más angosto (0,3 km de ancho) y sinuoso y no presenta barras de sedimento, la relación trenza-canal es 1, el gradiente es 0,05% y el índice de sinuosidad es 1,5, dichos valores junto con otros señalados en la **Tabla 3-3** indican un canal meándrico. Así mismo, al inicio del canal oriental hay una avulsión que genera un cauce con una dirección inicial W-E que después de unos 3 km cambia a N10E aproximadamente hasta que este cauce se une al canal principal del río Magdalena en la población de Puerto Mosquito.

Dado que en el tramo A coexiste un canal trenzado al occidente y un canal meándrico al oriente, que se bifurcan en ángulos rectos a obtusos y que la forma del terreno que los separa es cóncava, se puede decir que se trata de un tramo anastomosado separado por llanura de inundación, cuyas unidades fluviales son diques naturales, canales activos, lagunas o ciénagas, llanura de inundación y terraza, además como rasgos fluviales se

observan cicatrices de migración, como se aprecia en la **Figura 3-5**, que además contiene una sección transversal donde se indica la ubicación de estas unidades y rasgos.

Tabla 3-3: Parámetros del Río Magdalena en los tramos de la zona centro

Tramo	Ángulo de bifurcación	Forma terreno entre canales	Relación trenza-canal	Disposición de las barras	Gradiente	Índice de sinuosidad
A (canal oriental)	~30°	convexa	1	Longitudinal y de punta	0,04%	1,5
A (canal occidental)	~80°	convexa	2	Longitudinal y transversal	0,05%	1,02
B	~50°	convexa	1	Longitudinal	0,02%	1,04

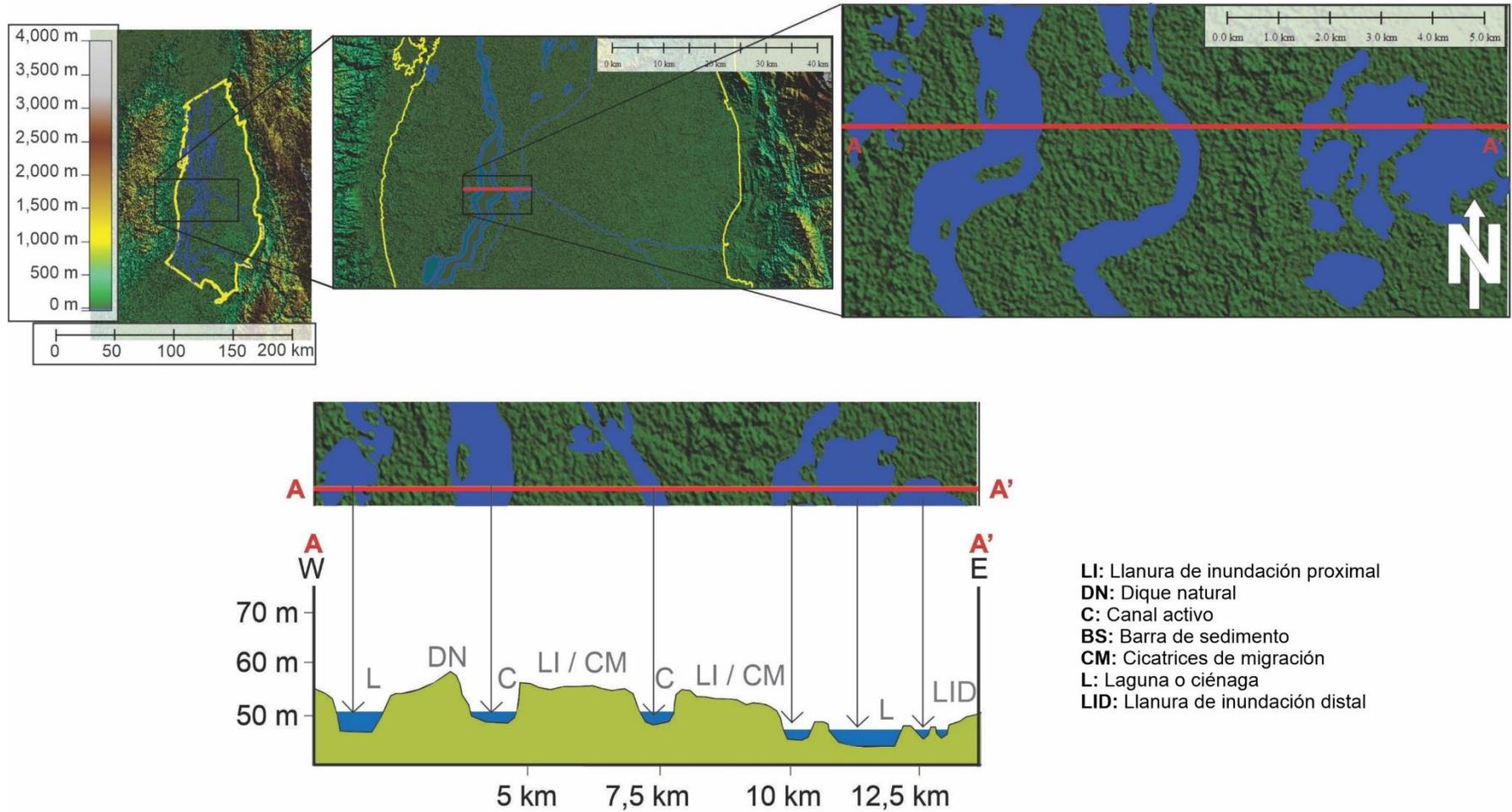
Fuente: Elaboración propia.

El tramo B inicia con la unión de los canales bifurcados, en este tramo el río cambia su dirección a N10W y se mantiene así por alrededor de 20 km, en los que se observan barras de sedimento paralelas al cauce y cuyas características, listadas en la **Tabla 3-3**, indican una vez más un sistema trenzado sinuoso, cuyas unidades fluviales son canales activos, barras de sedimento, llanura de inundación, terraza y lagunas o ciénagas, además como rasgos fluviales se observan cicatrices de migración, la **Figura 3-6** contiene una sección transversal donde se indica la ubicación de estas unidades y rasgos.

En toda la zona centro el cauce trenzado sinuoso del río Magdalena continúa exhibiendo barras de sedimento paralelas y transversales al río de 1,5 km a 3 km de largo por 0,6 km a 1,5 km de ancho. Al inicio del tramo B se desprende un cauce menor que se ubica al occidente del río Magdalena y se dirige subparalelo a través de un complejo cenagoso, la mayoría de las ciénagas son elongadas y paralelas a los cauces, con eventuales excepciones que presentan bordes irregulares.

Figura 3 - 5: Unidades fluviales zona centro A

ZONA CENTRO A

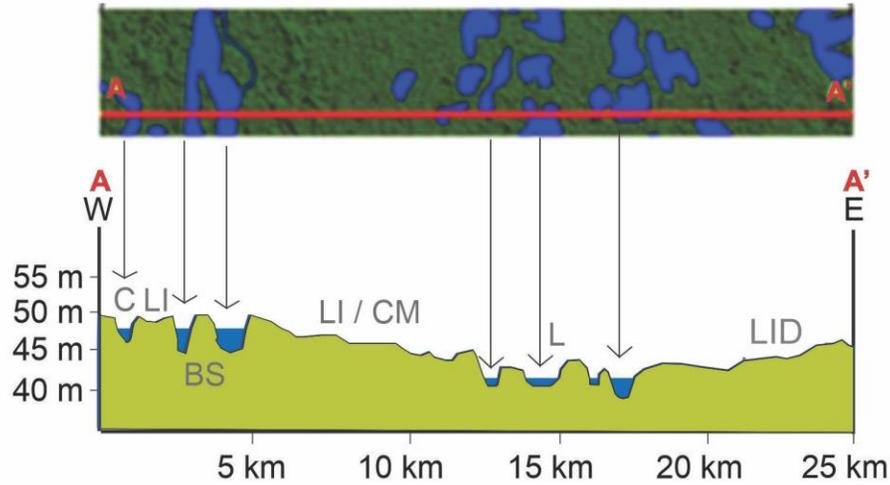
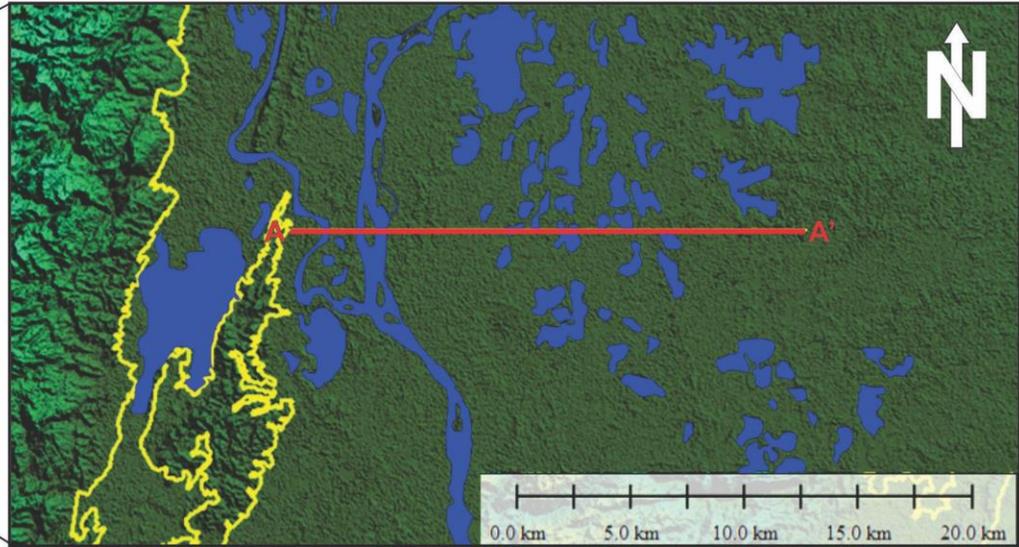
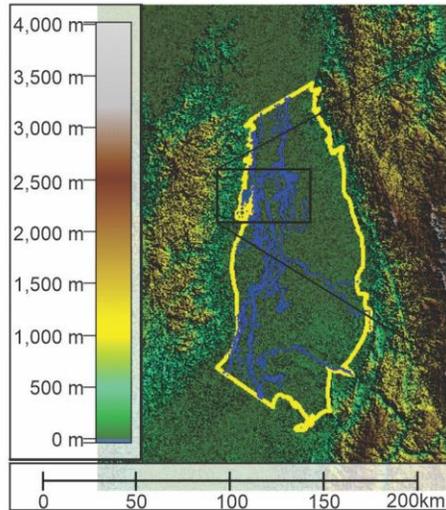


- LI: Llanura de inundación proximal
- DN: Dique natural
- C: Canal activo
- BS: Barra de sedimentación
- CM: Cicatrices de migración
- L: Laguna o ciénaga
- LID: Llanura de inundación distal

Fuente: Elaboración propia

Figura 3 - 6: Unidades fluviales zona centro B

ZONA CENTRO B



- C: Canal activo
- LI: Llanura de inundación proximal
- BS: Barra de sedimento
- CM: Cicatrices de migración
- L: Laguna o ciénaga
- LID: Llanura de inundación distal

Fuente: Elaboración propia

▪ Río Lebrija

En la zona centro también se encuentra el río Lebrija, cuya cuenca presenta drenajes de hasta orden 5 según la clasificación de Horton-Strahler (Strahler, 1957), de manera que el río Lebrija corresponde a un drenaje de orden 6, que es mucho más angosto y sinuoso que el río Magdalena y tiene una orientación N45W hasta las ciénagas Chocóa y Achiote, donde además de encontrarse con el canal de la avulsión al inicio del tramo B, se hace paralelo al Río Magdalena y se conforma de una serie de canales delgados (hasta 300 m de ancho), hasta la ciénaga Doña María al límite norte de la zona centro. Al norte del río Lebrija se encuentra el río San Alberto cuyo trazado es paralelo al del río Lebrija, aunque tiene una menor sinuosidad. Ambos ríos tienen comportamiento meándrico-sinuoso.

3.2.3 Zona norte

En la zona norte se encuentran las poblaciones de San Martín, Aguachica y Gamarra, que pertenecen al departamento del Cesar y Morales en el departamento de Bolívar. También se encuentra el río Magdalena, que para este trabajo se dividió en los tramos A, B o C, según cambios en su orientación (**Figura 3-3**).

Al inicio de la zona norte, en el tramo A el río Magdalena se bifurca en dos canales; el canal occidental, que corresponde al Brazo Simití mantiene su curso S-N al igual que el canal oriental que corresponde al canal principal del río Magdalena. En el tramo A el canal oriental tiene 0,6 km de ancho, un índice de sinuosidad de 1,12 y una relación trenza-canal de 1 (**Tabla 3-4**), por lo que se define como un cauce rectilíneo, localmente sinuoso, comportamiento que se repite con el Brazo Simití que es el canal occidental.

En el tramo B, el canal oriental gira abruptamente para tener una dirección N45E hasta Puerto Mosquito, donde además de iniciar el tramo C, el canal vuelve a girar para quedar paralelo al Brazo Morales. Finalmente, en el tramo C el brazo Simití tiene localmente una dirección W-E, sin embargo, gira al N y continúa en el Brazo Morales paralelo al Magdalena, tanto el canal principal (canal oriental) como el brazo Morales tienen una orientación aproximada N10E a N20E en todo este tramo hasta el final del AE.

Tabla 3-4: Parámetros del río Magdalena en los tramos de la zona norte

Tramo	Ángulo de bifurcación	Forma y de las barras	Relación trenza-canal	Disposición de las barras	Gradiente	Índice de sinuosidad
A	~55°	convexa	1	Longitudinal y de punta	0,08%	1,12
B	~60°	convexa	2	Longitudinal y transversal	0,08%	1,07
C	~43°	convexa	1	Longitudinal	0,03%	1,03

Fuente: Elaboración propia.

En el tramo C, además se observa que el interior de los canales hay barras de sedimento longitudinales de hasta 2 km x 0,5 km (descritas en la **Tabla 3-4**), y entre los canales hay un gran complejo cenagoso acompañado de canales delgados y cicatrices de migración que lo atraviesan. Las unidades fluviales de la zona norte son diques naturales, canales activos, barras de sedimento, llanura de inundación, terraza y lagunas o ciénagas migración, la **Figura 3-7** contiene una sección transversal donde se indica la ubicación de estas unidades.

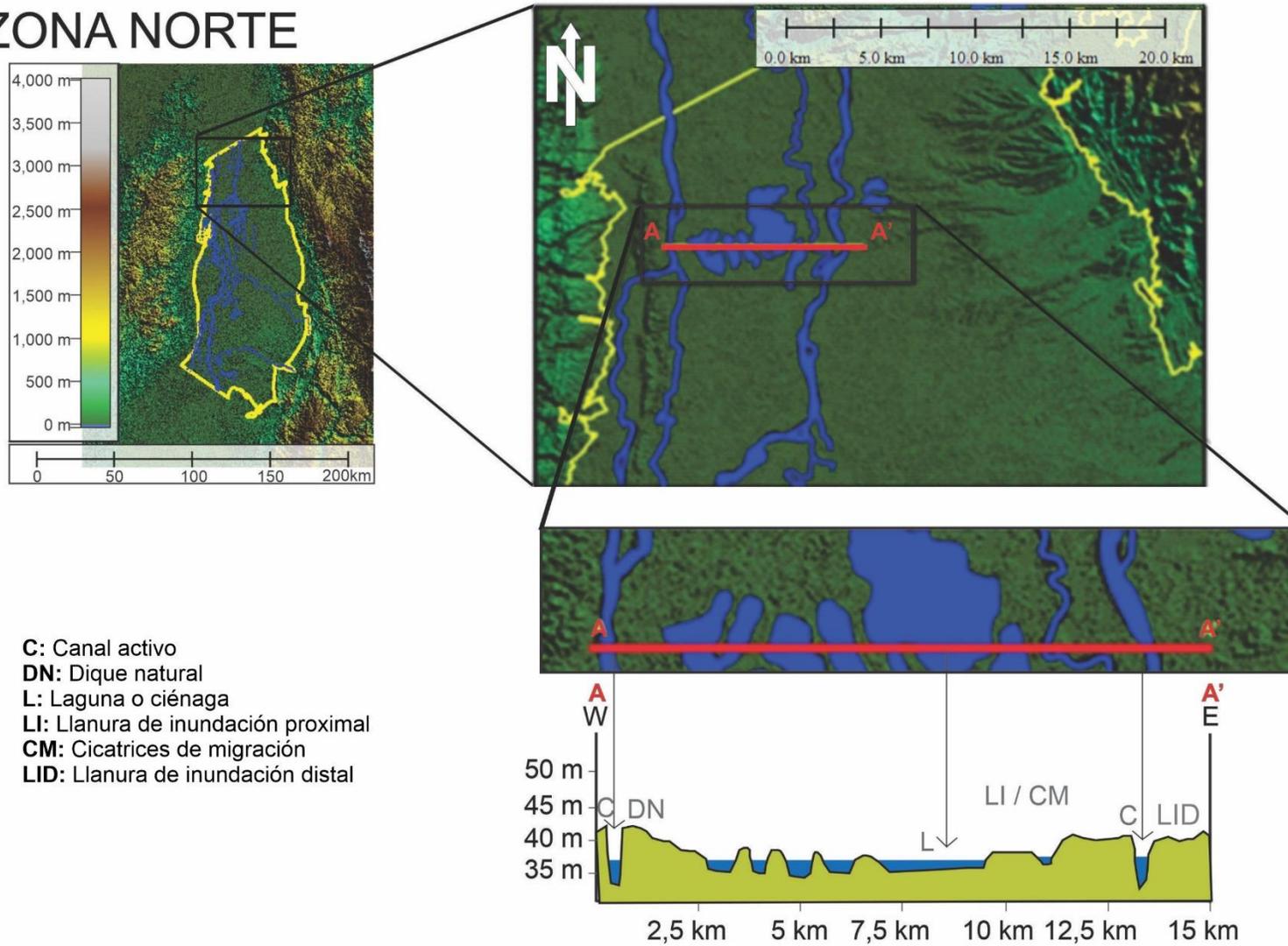
Las observaciones más interesantes en la zona norte son la avulsión que genera la coexistencia de dos canales del río Magdalena en toda esta zona, el giro abrupto del canal oriental en el tramo B y que en el tramo C los dos canales se mantienen paralelos y son mucho más delgados y rectos a comparación del río Magdalena en toda el AE.

3.3 Componente temporal de la dinámica fluvial

En la sección anterior se describió la configuración actual de la morfología del sistema fluvial del río Magdalena en el AE, en esta sección se presenta la variación del área de las

Figura 3 - 7: Unidades fluviales zona norte

ZONA NORTE



Fuente: Elaboración propia

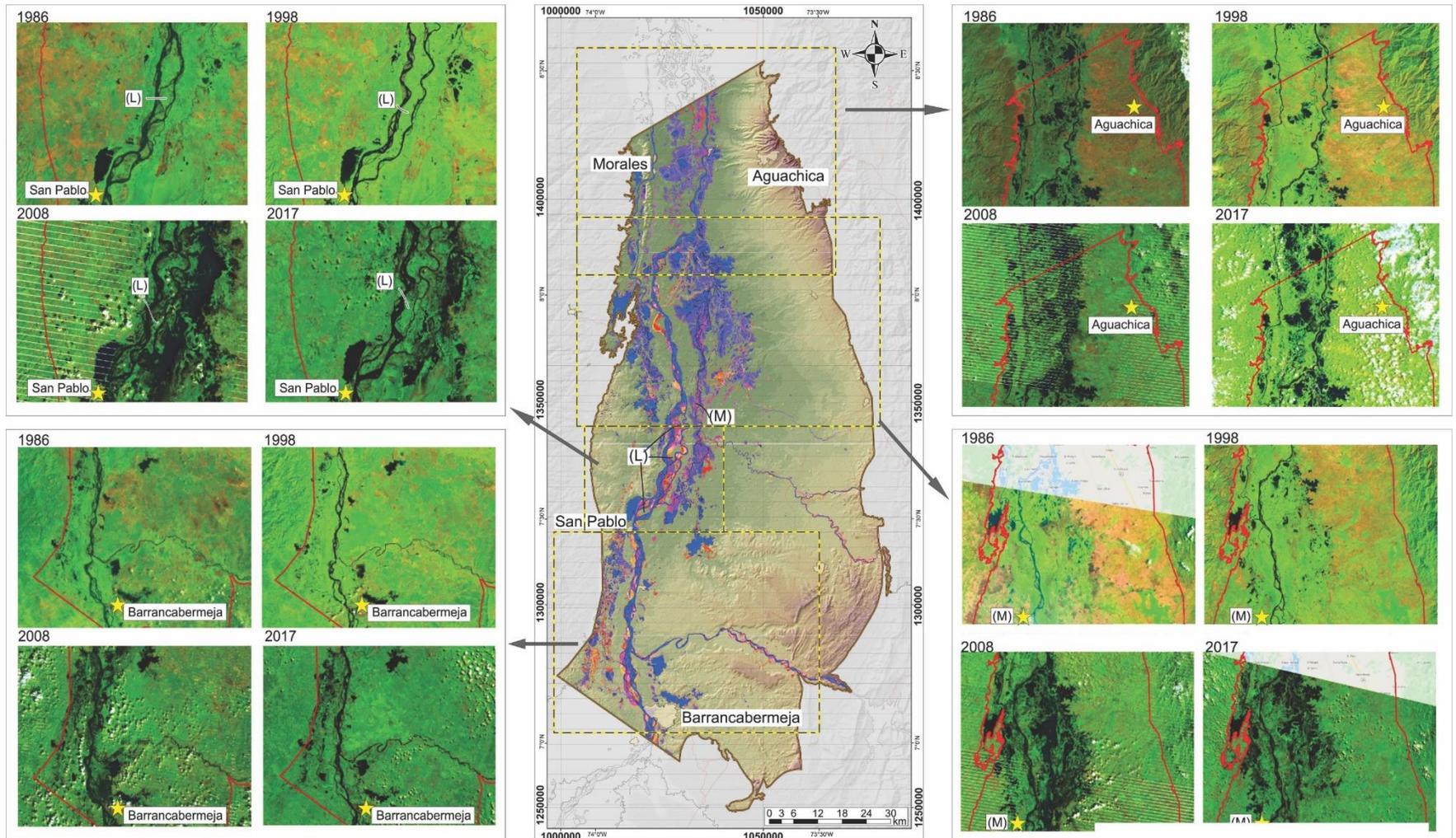
unidades de agua superficial en un periodo de tiempo y la influencia de las variables hidroclimáticas en la morfodinámica del río.

Los resultados de esta sección son, en primer lugar, el mapa multitemporal de dinámica fluvial (**ANEXO E**), que se elaboró a partir del trabajo con imágenes satélites previamente descrito en el **Capítulo 2: Metodología en la sección Fase I: Mapa multitemporal**. En la **Figura 3-8** se aprecian algunos ejemplos del cambio en el área superficial de los ríos y ciénagas durante las últimas décadas, en los que se resaltan los años 1986 y 1998 como algunos de los más secos, así como los años 2008 y 2017 corresponden a algunos de los más húmedos, presentando inundaciones. Por otro lado, en la zona centro se observa que:

1. La llanura de inundación entre los canales bifurcados del río Magdalena marcada como (L), es ocasionalmente invadida por cauces menores que conectan los dos canales principales;
2. El desarrollo del *crevasse splay* al NE de San Pablo; y
3. A partir del punto (M) se desarrolla una entrada de agua superficial sobre la llanura de inundación que bordea al río Magdalena. Finalmente, se evidencia que las mayores variaciones en el área del río Magdalena se dan en la zona centro.

En segundo lugar, en el mapa de precipitación (**ANEXO L**) se aprecia una variación espacial, de modo que la zona sur del AE presenta precipitaciones de 2500 a 4000 mm/año, la zona centro presenta precipitaciones de 1500 a 2500 mm/año y la zona norte tiene valores de precipitación que van de 1000 a 2000 mm/año; la escorrentía en toda el AE es de 2112 km³/año aproximadamente. En ese sentido la (**ANEXO Z**) compara la variación del tamaño de los cuerpos de agua superficial con el índice ONI (**ANEXO M**), indicando que en los años 1998, 2002, 2010 y 2020 hubo fenómeno del niño y en los años 2008, 2009, 2011 y 2017 hubo fenómeno de la niña, dentro de los que se destaca el año 2008 como un año de fenómeno de la niña fuerte, lo anterior supone una relación directa entre la variación del área del río Magdalena y las ciénagas aledañas con la precipitación en los años indicados.

Figura 3 - 8: Variación temporal del sistema fluvial en el AE



Fuente: Elaboración propia

En consecuencia con la anterior observación, el (**ANEXO AA**) presenta el cambio de área de algunas ciénagas (distribuidas en toda el AE), sin embargo la relación observada entre la precipitación y el río Magdalena no es la misma que se observa con las ciénagas; en este caso, la variación del agua se puede agrupar de acuerdo a la zona donde se encuentran las ciénagas, de manera que en la zona sur del AE las ciénagas presentan menor variación en su área pese a que en esta zona se tienen los mayores datos de precipitación, contrario a lo observado en las ciénagas ubicadas en las zonas centro y norte. Esto podría deberse a que en las zonas centro y norte del AE las ciénagas están más cercanas al río y en conexión con el mismo.

4. Discusión

En esta sección se discutirán los resultados obtenidos en la presente investigación con el fin de analizar la evolución de la morfodinámica del sistema fluvial del río Magdalena durante el Holoceno en el AE, para lo cual se busca entender el funcionamiento del sistema fluvial actual del río Magdalena según sus rasgos, también se profundizará en la influencia de las condiciones geológicas y geomorfológicas en la dinámica fluvial y por último se entenderá la relación de variables hidro-climatológicas con la dinámica fluvial del río Magdalena. Lo anterior con el fin de hacer una interpretación de la evolución del río Magdalena de sistema trezado sinuoso a sistema anastomosado en el AE.

4.1 Unidades y rasgos fluviales

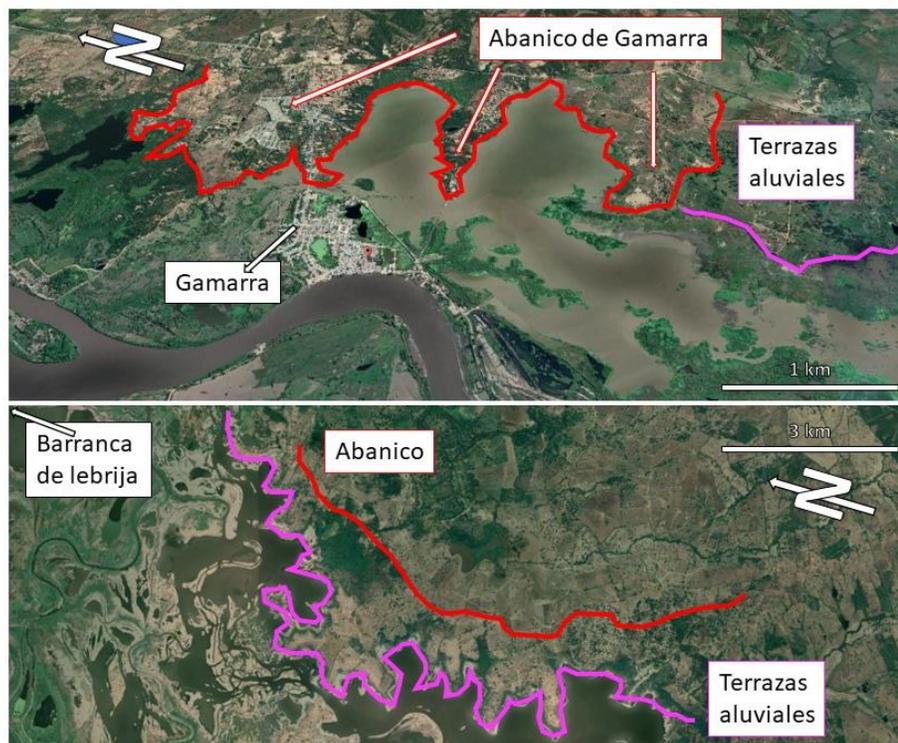
Las unidades y rasgos fluviales identificados en el AE se dividieron en cuerpos de agua superficial, depósitos, unidades de divagación y rasgos, se debe tener en cuenta que los primeros tres corresponden a cuerpos que abarcan un área o volumen determinado, mientras que los rasgos son superficies observadas sobre el terreno. Al comparar la cantidad y el área cubierta por cada uno de estas unidades o rasgos, se identificó que los procesos de transporte y sedimentación predominan en el comportamiento del río Magdalena en el AE; coincidiendo con lo que se esperaba por la ubicación del AE dentro de la cuenca completa del río, además, por su cercanía al VIM, las pendientes del AE son de 0,35 m/km en promedio y sus alturas varían entre 50 y 75 msnm, estos factores favorecen los procesos de transporte y sedimentación.

A partir de la interpretación de los depósitos del sistema fluvial, se deduce que las barras de sedimento dependen de dinámicas de sedimentación y erosión de los canales, y su espesor está influenciado por la magnitud y profundidad de dichos cauces; las barras pueden estar conformadas por las partículas más gruesas que van en suspensión. Por otro

lado, las partículas en suspensión que van quedando después de las que se acumulan en las barras, se depositan alrededor del río en épocas de inundación y su acumulación progresiva conduce a la generación de diques naturales, asimismo las partículas en suspensión más finas se depositan sobre el terreno adyacente a los diques naturales y conforman las llanuras de inundación. En el AE se encontraron llanura de inundación proximal y distal, de las cuales, por su cercanía al río se deduce la primera es más reciente que la segunda. Las partículas de sedimento que van en saltación o arrastre son las que se van acumulando en el fondo del canal y gradualmente conforman los depósitos de canal, que no fueron analizados en este trabajo.

Se deduce que las terrazas identificadas en este trabajo están relacionadas a la ampliación del valle del río Magdalena, puesto que como se aprecia en la **Figura 4-1** se tratan de morfologías escalonadas producto de la divagación y erosión de los canales sobre los abanicos que alcanzaron el sistema fluvial, de manera que corresponden a terrazas aluviales.

Figura 4-1: Variación espacial del sistema fluvial en el AE



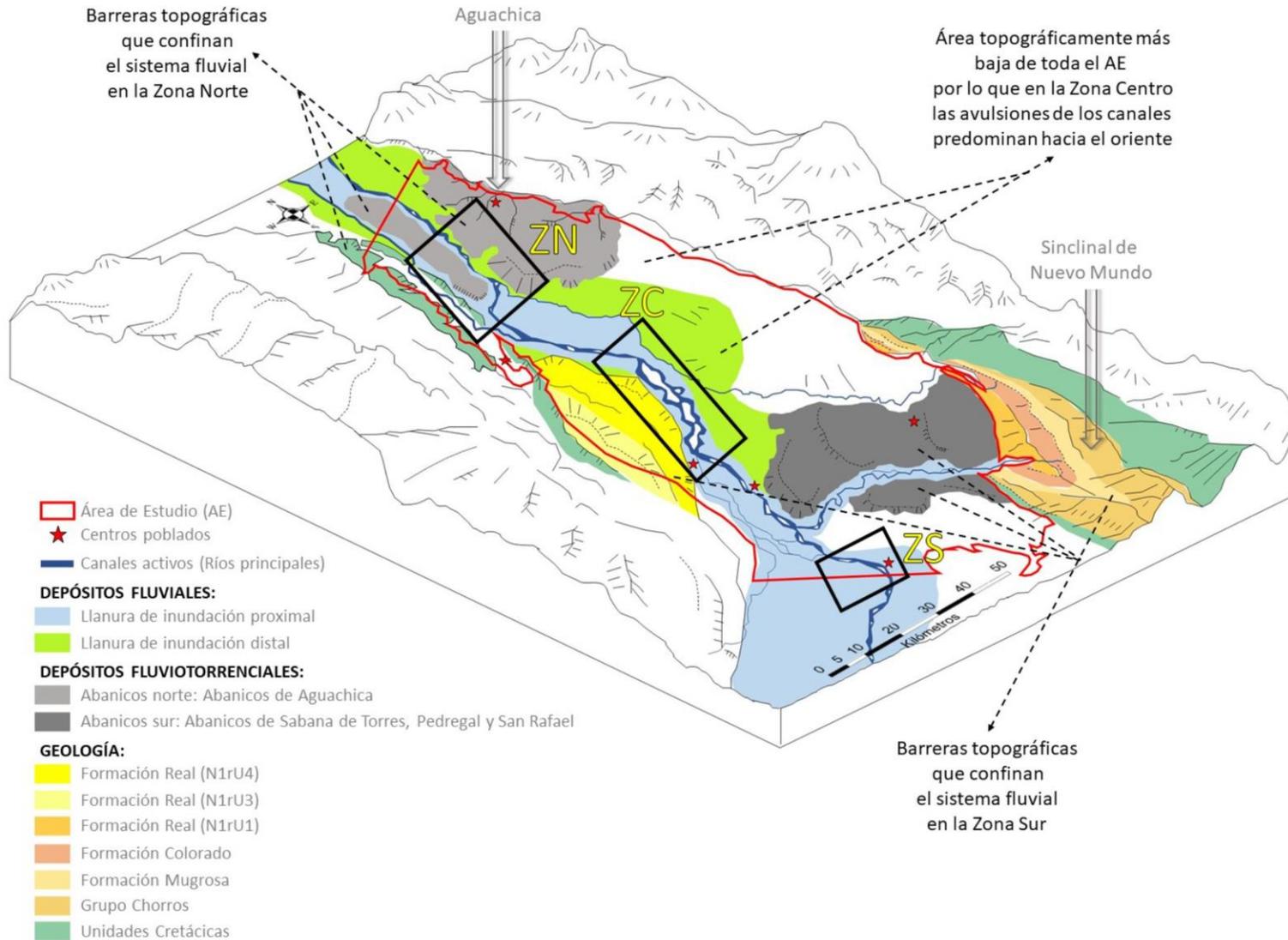
Fuente: Elaboración propia.

Aun cuando las unidades de divagación y los rasgos se identificaron en toda el AE, la zona centro manifiesta un incremento en las cicatrices de migración y alta frecuencia de avulsión, evidenciando un sistema fluvial dinámico y activo en constante divagación.

4.2 Condiciones geológicas y geomorfológicas

Como se aprecia en la **Figura 4-1**, se encontró que en la zona sur del AE, el río está confinado por los abanicos San Rafael y Sabana de Torres al Oriente y por la Serranía de San Lucas al Occidente, de manera que, en esta zona el río Magdalena tiene un valle estrecho y se constituye como un río sinuoso trezado con inexistencia de llanura de inundación distal, como resultado de su alto caudal en un valle confinado. En la **Figura 4-2** también se aprecia que la ausencia de abanicos al Oriente del río Magdalena en la zona centro del AE, le permite al río construir llanuras de inundación distal y proximal que abarcan gran área que se incrementa hacia el oriente, las llanuras de inundación están compuestas principalmente por material fino que favorece su cohesión; por lo tanto su existencia ayuda al cambio de la configuración espacial y de la dinámica fluvial del río, puesto que los puntos de aforo de los ríos Sogamoso y Cimitarra localizados en la zona centro representan aporte de sedimento y mayor volumen de agua en el río Magdalena; este incremento hace que el río se distribuya en varios canales sobre la llanura de inundación. Adicionalmente, en la zona norte del AE, los abanicos de Aguachica vuelven a confinar el río Magdalena al Oriente y este se configura en dos canales trezados sinuosos. Resumiendo lo expuesto anteriormente, entre las poblaciones de Barrancabermeja y Aguachica el río Magdalena presenta tramos intercalados de sistema trezado y anastomosado que están ligados a la presencia de abanicos que llegan hasta el sistema fluvial y se interdigitan con este o lo confinan **Figura 4-2**.

Figura 4 - 2: Variación espacial del sistema fluvial en el AE

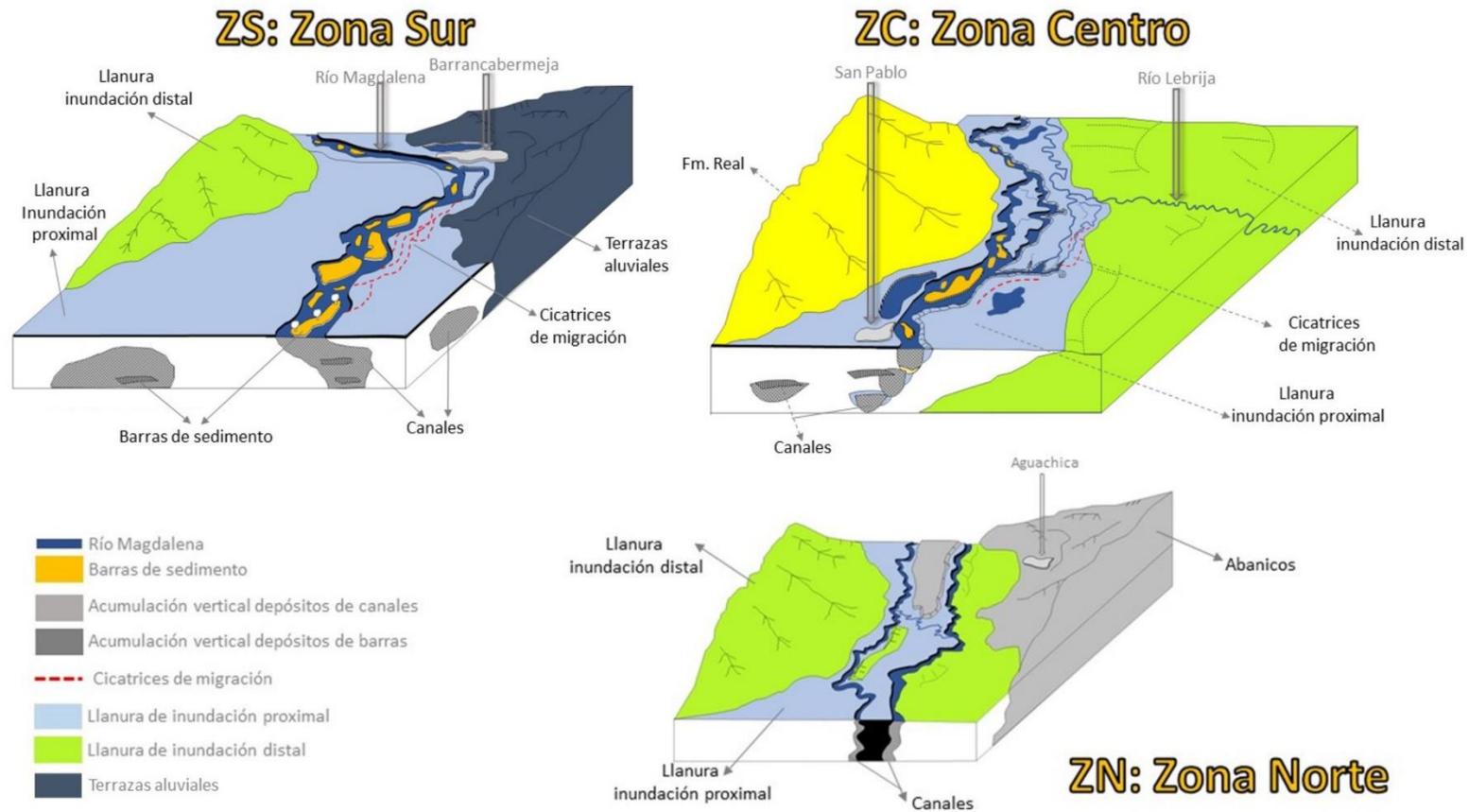


Fuente: Elaboración propia

El análisis del componente espacial del río Magdalena a lo largo del AE, muestra una relación directa del cambio de dinámica fluvial con la existencia de abanicos que confinan el valle; de manera que ante la presencia de abanicos el río presenta un comportamiento trezado sinuoso, mientras que, en el caso contrario, el río se configura en un sistema anastomosado. Por otro lado, en las zonas sur y norte del AE, se identificaron cuerpos cuya morfología es escalonada, que se ubican adyacentes a las llanuras de inundación bordeando los abanicos aluviales, dada su geometría y su vinculación con los abanicos, dichos cuerpos se interpretaron como terrazas aluviales moldeadas producto de la ampliación del valle del río Magdalena, a medida que este divaga y erosiona las superficies circundantes.

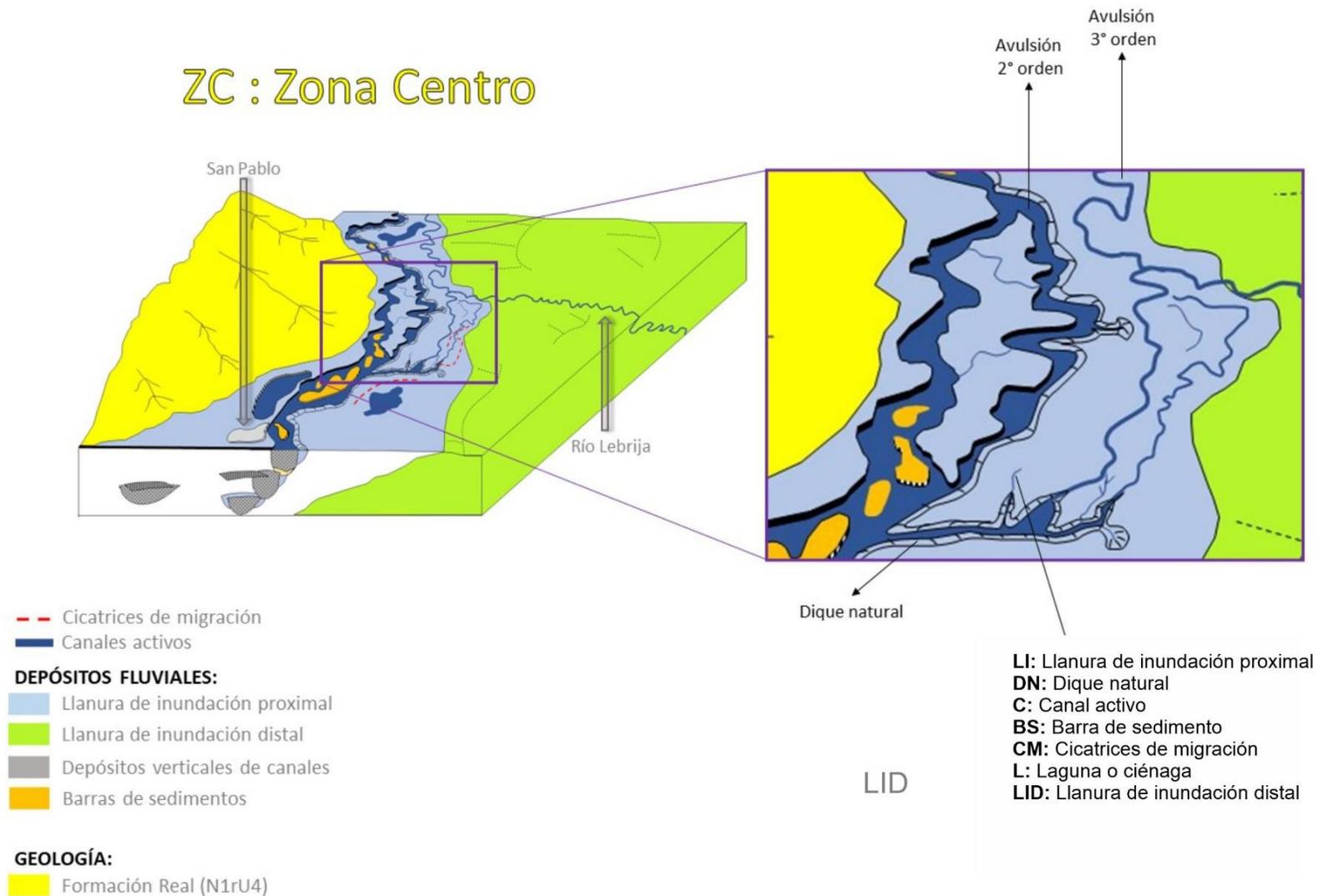
En la **Figura 4-3** se aprecian una serie de bloquediagramas construidos a partir de la distribución de las unidades y rasgos de dinámica fluvial identificados en este trabajo, en ellos se aprecia el carácter trezado del río Magdalena en la zona sur, que responde a un río de alto caudal en un valle confinado por terrazas aluviales que fueron construidas por el mismo río sobre los abanicos. Dichos abanicos se movieron de manera perpendicular al río en dirección E-W, extendiéndose hasta su cauce e inclusive en algunos sectores lo cruzaron hasta abarcar terreno al Occidente de su orilla occidental, lo que probablemente ocasionó que el nivel base del lecho del río aumentara. La mayor variación del sistema fluvial se observa en la zona centro debido a que en esta zona el sistema fluvial no está confinado al Oriente, lo que permite que el río se extienda libremente generando un cambio en el régimen fluvial y dejando cicatrices de migración y huellas temporales a su paso, que posiblemente están asociados a eventos hidrometeorológicos extremos. Asimismo el aumento en el nivel base del río Magdalena producto del avance de los abanicos en la zona sur, junto al incremento de la carga de sedimentos y agua en la zona centro (debido de la desembocadura de los ríos Sogamoso y Cimitarra) provocaron avulsiones en esta zona, que probablemente se generaron conforme al proceso descrito por (BSG, 2014), en el que el nivel de agua en un canal se incrementa hasta alcanzar el nivel de la adyacente llanura de inundación y posteriormente se desborda en algún punto en el que el dique natural del río se haya roto.

Figura 4 - 3: Variación espacial del sistema fluvial en cada zona del AE



Fuente: Elaboración propia

Figura 4 - 4: Esquema avulsión zona centro



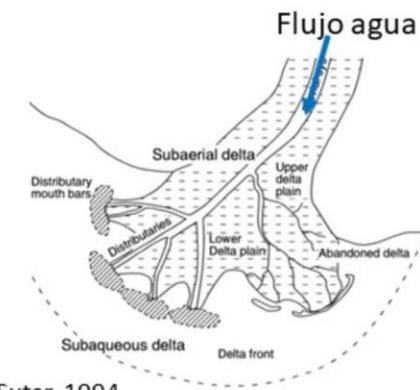
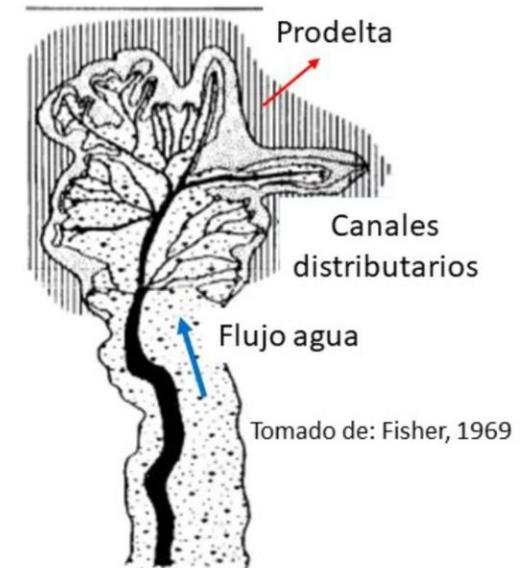
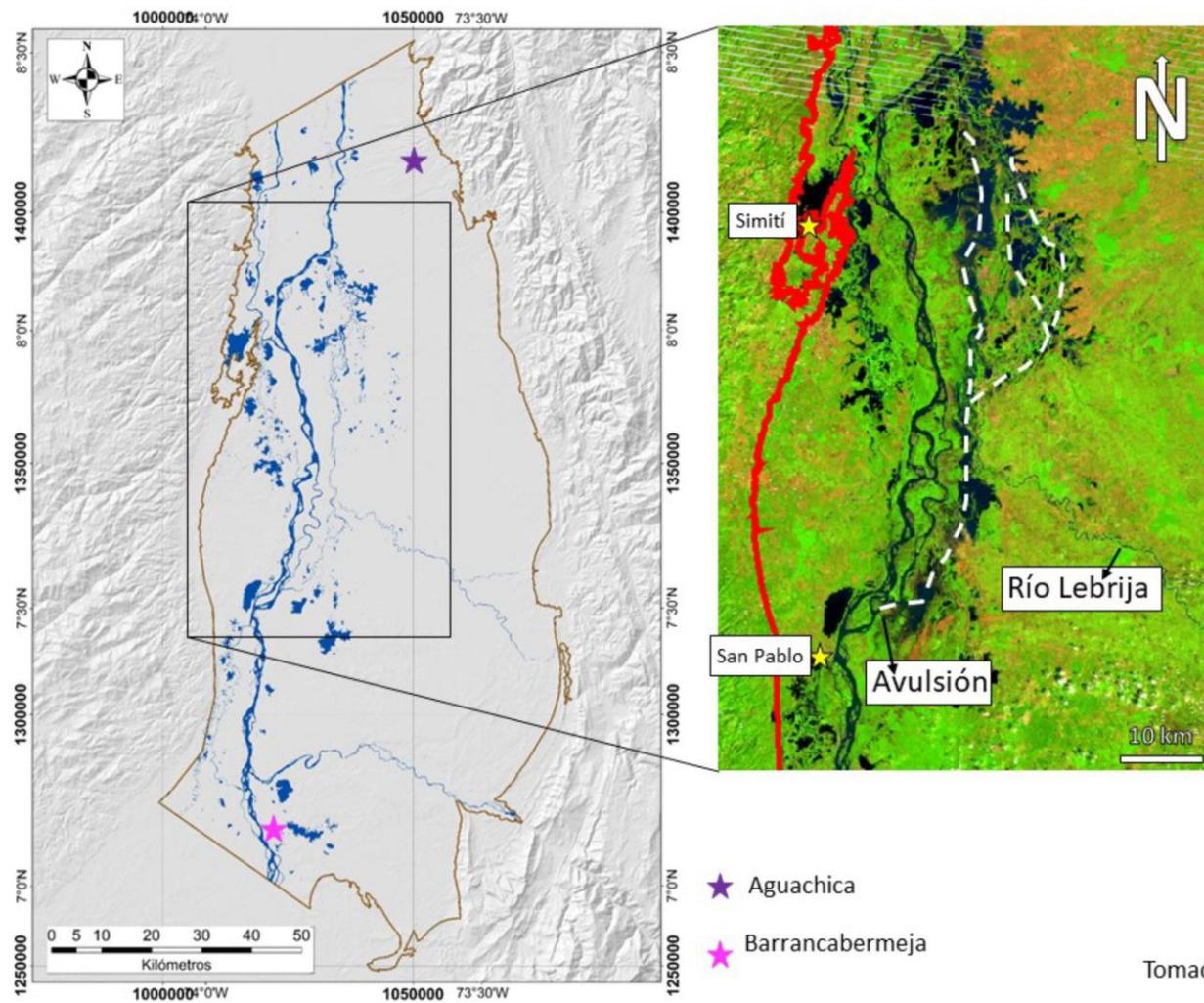
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el estudio de Nardini *et al.* (2020) y a lo observado en esta investigación, al no estar confinado en la zona centro, el río construyó llanura de inundación y como se aprecia en la **Figura 4-4**, la superficie de terreno que rodea los canales que coexisten en la zona centro, también se interpreta como llanura de inundación. La cual, al presentar valores bajos de pendiente (0° a 15°) conduce a que los valores *stream power* del río sean bajos ($<<0.5$); lo anterior favoreció la generación de avulsiones (Morón-Polanco, 2016), que caracterizan el sistema anastomosado desarrollado en la zona centro, asimismo la llanura de inundación permite el alargamiento de los canales, dicha situación se ocurre con mayor frecuencia en la zona centro del AE, debido a que en las otras zonas los abanicos confinan el río y actúan como barrera topográfica que impide la generación de avulsiones. Además, las avulsiones se concentran al Oriente del río Magdalena en el sector entre San Pablo y Simití coincidiendo coincide con el depocentro de la cuenca de acuerdo con Ángel-Martínez (2020), lo que permite que el río divague.

En la **Figura 4-5** se puede apreciar como la avulsión de San Pablo es alcanzada por los ríos Lebrija y San Alberto, de manera que esta confluencia de cauces desarrolla un delta elongado paralelo al río Magdalena, que se distribuye sobre la llanura de inundación, confirmando que la existencia de llanura de inundación ayudó a la configuración del sistema anastomosado, ya que su material fino, al ser menos competente que el material de los abanicos o de la Formación Real, permite que los nuevos canales del río se abran paso sobre esta. En la zona norte los abanicos de Aguachica vuelven a confinar el río, de manera que cerca del municipio de Gamarra la geometría del río se modifica y el delta mencionado anteriormente (**Figura 4-5**) se interdigita con las ciénagas y el abanico (lo que se puede apreciar en el mapa TWI (**ANEXO J**)).

De acuerdo con Smith (1986) una de las características sobresaliente de los tramos anastomosados es el predominio de la acumulación vertical, más que lateral, de los sedimentos de un canal; dicha tendencia da como resultado una rápida agradación en los canales de baja sinuosidad, que está condicionada por niveles elevados en la base del lecho del canal, que en el caso del río Magdalena se debe al avance de los abanicos. De igual manera, Makaske (2009) expone que un canal con alta agradación es más propenso a desarrollar avulsiones.

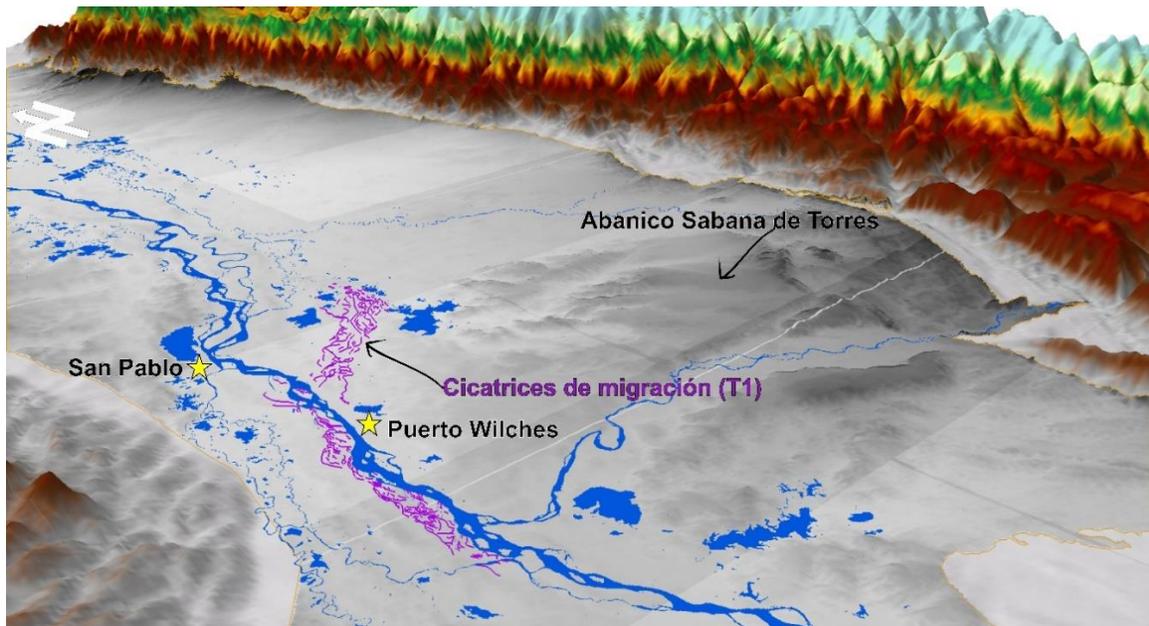
Figura 4 - 5: Delta elongado desarrollado en la zona centro



Fuente: Elaboración propia

Una evidencia de la alta agradación del sistema fluvial en la zona centro del AE se presenta en la **Figura 4-6**, donde se aprecia un conjunto de cicatrices de migración ubicadas al norte de Puerto Wilches, que están limitadas por el Abanico de Sabana de Torres y que sugieren que en un T1 el río Magdalena se bifurcó de la misma manera en la que actualmente se encuentra bifurcado en el municipio de San Pablo.

Figura 4-6: Análisis A cicatrices de migración



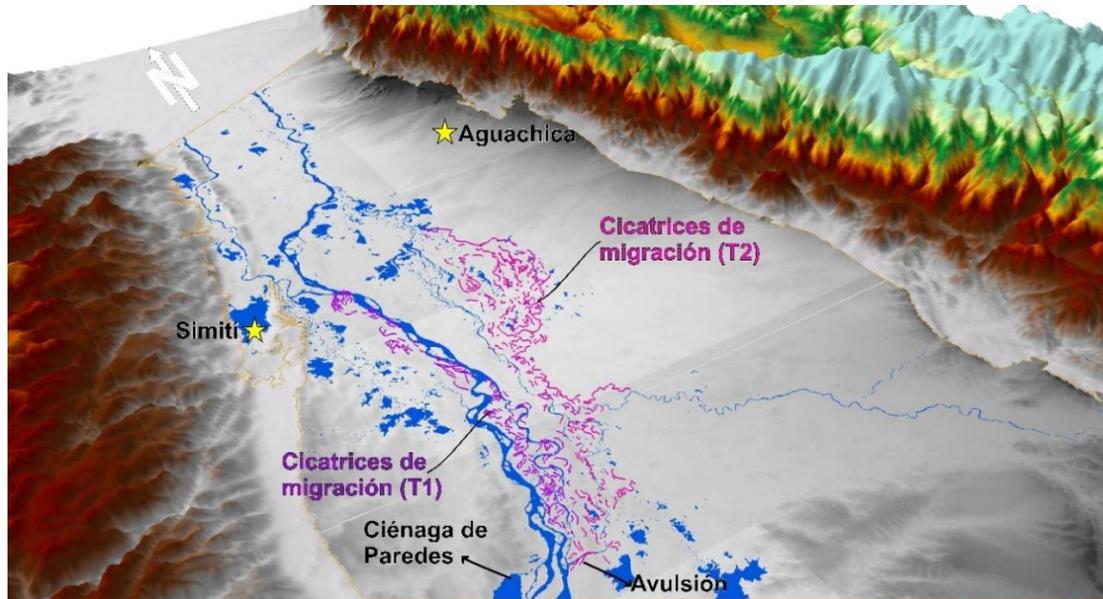
Fuente: Elaboración propia.

Al Este de la ciénaga de Paredes, en San Pablo, también se identificaron cicatrices de migración **Figura 4-7** que disectan la llanura de inundación, estos rasgos pueden corresponder a divagación del canal meándrico actual o a un canal meándrico previo desarrollado en un T1. Además, se observaron cicatrices de migración al Occidente del río Magdalena, que por su trazado se deduce que corresponden a divagación del canal sinuoso trenzado actual. Asimismo, se identificó una avulsión en el margen oriental del río ubicada al Este de San Pablo.

Continuando con el análisis de la variación espacial del sistema fluvial, en la **Figura 4-3** se aprecia que en la zona norte del AE, el río Magdalena se configura en dos canales paralelos, levemente sinuosos que son mucho más delgados y rectos a comparación del

río Magdalena en toda el AE. Sin embargo, al iniciar la zona norte el canal oriental da un giro abrupto al Este y como se indica en la **Figura 4-9** puede estar influenciado por los trazos de las fallas Pozo Azul y San Blas.

Figura 4-7: Análisis B cicatrices de migración



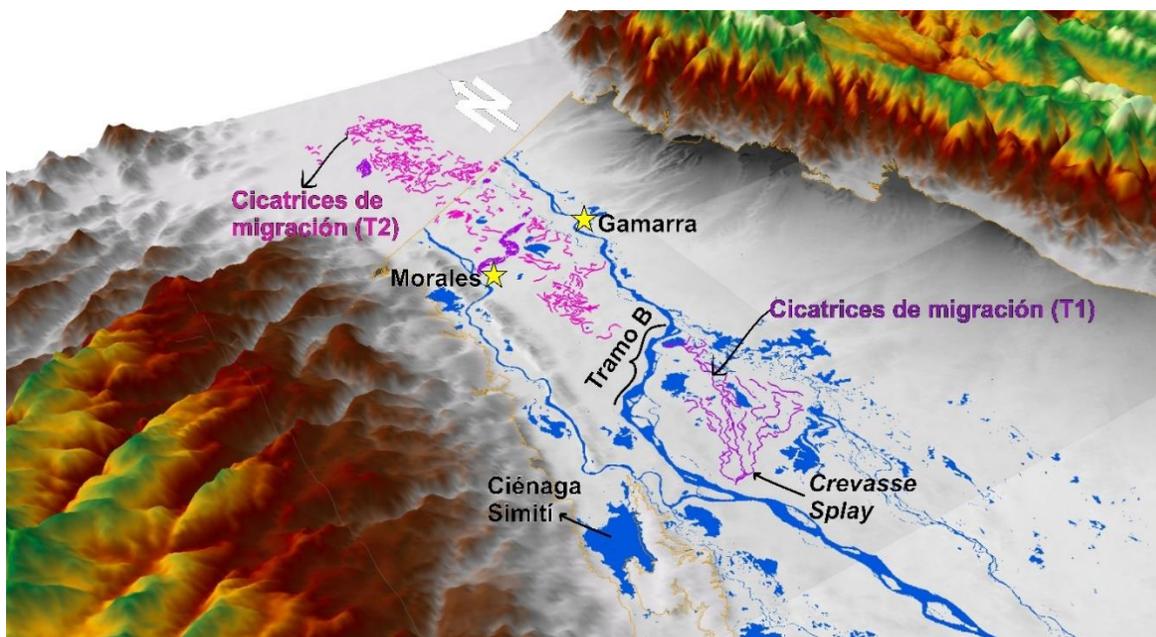
Fuente: Elaboración propia.

Tal como se observa en la zona sur, en la zona norte los abanicos se movieron en dirección E-W de forma perpendicular al río, extendiéndose hasta su cauce e inclusive cruzándolo en la mayor parte de los sectores, de esta manera el terreno entre los dos canales en la zona norte, corresponde a vestigios de abanicos aluviales. Y el material competente del que están compuestos dichos abanicos ocasionó el cambio del sistema anastomosado a dos canales paralelos, levemente sinuosos, que debido a la escasa energía disponible para la erosión lateral representada por el bajo *stream power* de los canales, junto con la mínima pendiente del terreno y un valle estrecho por los abanicos, da como resultado que el río Magdalena y los brazos Simití y Morales comiencen a socavar, lo que se infiere de la **Figura 3-7** donde se evidencia que la profundidad de los canales es mayor que su ancho, estas observaciones coinciden con Makaske (2009) que indicó que la socavación de los canales ocurre si la degradación del lecho excede la tasa promedio de crecimiento del dique natural, en consecuencia en la **Figura 3-7** se puede apreciar que los diques en esta

zona son muy bajos y que el río mantiene su área constante en toda la zona norte (ver mapa multitemporal **ANEXO E**).

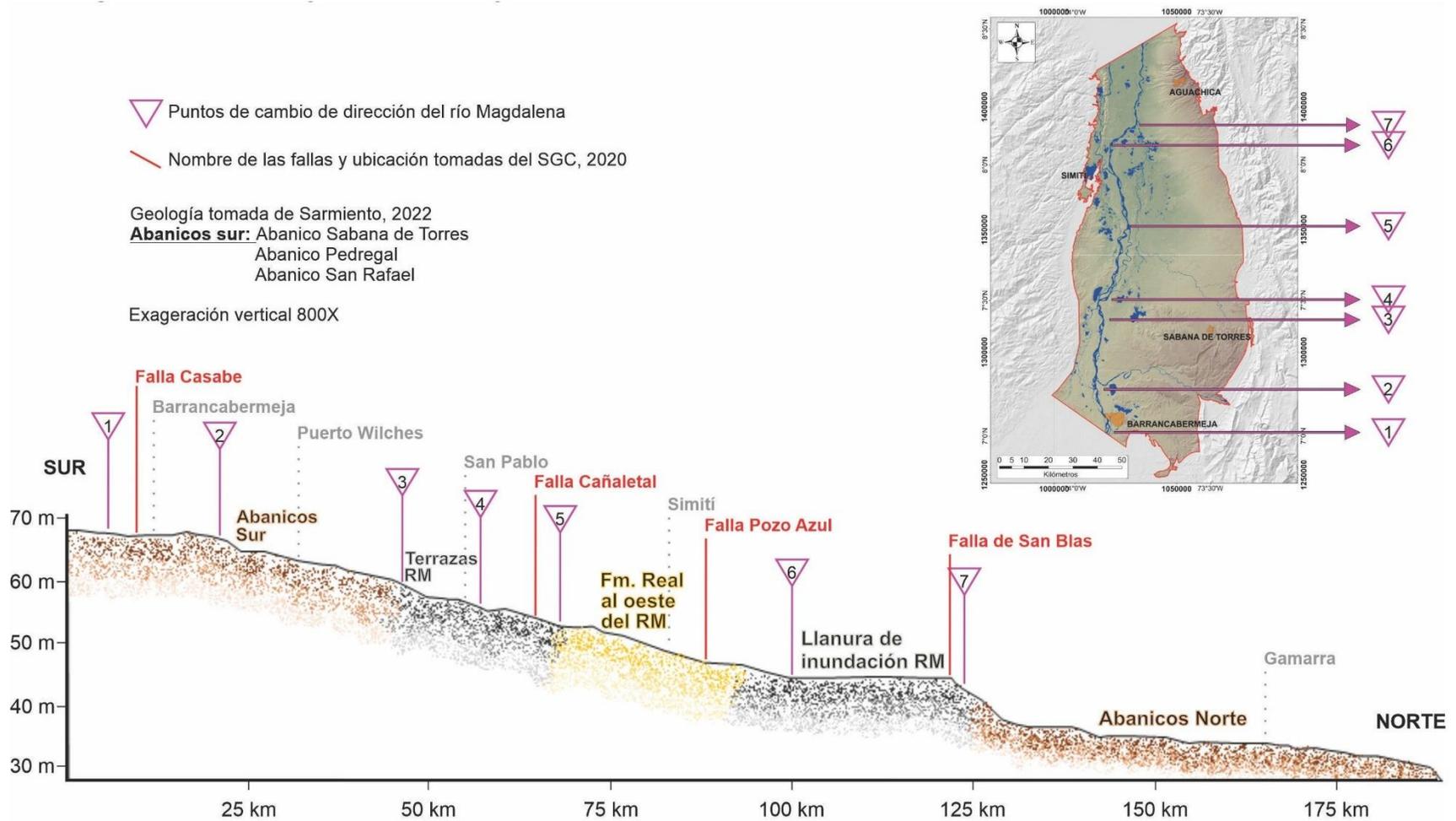
Por último, en la zona norte del AE a la altura de la ciénaga de Simití, justo donde los abanicos se interdigitan con las ciénagas, se identificó una avulsión de primer nivel en la (**Figura 4-8**), cuyo rastro sugiere que solo generó un *crevasse splay* sin desarrollar un canal nuevo, asimismo, por equivalencia en las alturas y características de los sectores donde se encuentra dicha avulsión, se deduce que pudo producirse en un T1. Además, se identificó que entre las poblaciones de Morales y Gamarra también durante un T1 se conformó un canal trenzado sinuoso, paralelo al cauce actual que se observa en el tramo B y cuyo trazado también puede estar delimitado por las fallas Pozo Azul y San Blas. Posteriormente en un T2, sobre los vestigios de abanicos aluviales que separan los canales paralelos de la zona norte, hubo canales que divagaron dejando registro mediante las cicatrices circundantes al río. Por lo tanto, aunque en la zona norte el sistema fluvial está conformado por dos canales sinuosos paralelos, se sigue considerando anastomosado debido a las avulsiones registradas y a las cicatrices de migración sobre la llanura de inundación que sugieren la existencia de canales previos.

Figura 4-8: Análisis C cicatrices de migración



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4 - 9: Perfil topográfico del río Magdalena a lo largo del AE



Fuente: Elaboración propia

Aunque los demás ríos del AE no hicieron parte del objeto de esta investigación, en el análisis de los resultados se observa que los abanicos también afectan su dinámica, ya que de acuerdo con las cicatrices de migración es posible determinar que el río Sogamoso (zona sur) mantuvo una orientación NW en toda el AE hasta desembocar en el río Magdalena, sin embargo, el abanico Sabana de torres provocó un cambio de orientación en el río Sogamoso, mientras que el río Lebrija al ingresar al AE (zona centro) se comporta como un río meándrico, debido a la poca pendiente del valle y el espacio que brinda la llanura de inundación distal que coincide con el depocentro.

4.3 Variables hidroclimatológicas

Otro factor observado en esta investigación es el estancamiento de agua a manera de lagos o ciénagas en la zona centro del AE, que se puede evidenciar en el mapa de TWI (**ANEXO J**); estos cuerpos de agua actúan como reguladores del comportamiento hidrológico de los ríos al amortiguar sus crecidas, además el estancamiento se debe a que la llanura de inundación se encuentra más baja que el río y que su pendiente es muy cercana a 0 (mapa de pendientes **ANEXO G**). Sin embargo, Jaramillo *et al.* en el 2015 propuso que las ciénagas se deben a diferencias topográficas producto de una red de bloques graben generados por el levantamiento de la Cordillera Oriental y la subsecuente acumulación de abanicos. Dichos hallazgos no contradicen los resultados de esta investigación y, por el contrario, los complementan, puesto que Tanner (1974) propuso que los canales del río Magdalena y sus ciénagas pueden ser ocasionados por la deformación tectónica de la Cordillera Oriental durante del Mioceno-Holoceno, sugiriendo una estrecha relación entre las fallas geológicas del VMM y el VSM con las tasas de hundimiento de la cuenca, las tasas de sedimentación y el comportamiento del río. Cabe mencionar que los puntos identificados en la **Figura 4-9** a lo largo del río Magdalena, en los que este varía su dirección son otra evidencia de la influencia estructural y geomorfológica sobre la morfodinámica fluvial del río.

El componente temporal y la interacción de las variables que componen el ciclo hidrológico, también inciden en la dinámica fluvial en el AE, ya que es evidente el aumento del volumen de agua debido a condiciones climáticas, lo que favorece el incremento en la frecuencia de las avulsiones, cabe mencionar que Makaske en 2001 estableció que el equilibrio de

los ríos anastomosados se alcanza por la relación entre la tasa de creación de canales y la tasa de abandono de canales, dichos valores no se calcularon en esta investigación, sin embargo, en el mapa multitemporal (**ANEXO E**) se aprecia que en las últimas décadas el río Magdalena ha tenido relativamente poco movimiento, con lo que se deduce su equilibrio. De igual manera se definió una temporalidad relativa de los procesos a partir del análisis y la interpretación de las cicatrices de migración identificadas, y se encontró que los factores espacio-temporales descritos en este trabajo se han repetido en un periodo de tiempo.

La interacción de las condiciones hidro-climáticas explican el porqué de la relación entre el área de los cuerpos de agua y la precipitación, descrita en el **Capítulo 3: Resultados en la sección Componente temporal de la dinámica fluvial** en algunos años hidrológicos como 2004-2005, 2012-2013, 2015-2016 y 2017-2018, no es directa, es decir, en los años indicados cuando hubo fenómeno de la Niña en vez de aumentar el área de agua superficial disminuyó y viceversa. Este comportamiento se puede deber a que en las épocas de lluvia, las capas de suelo alcanzan su mayor saturación y, por ende, en estos periodos de tiempo se presenta la mayor recarga e inundación, pero en la temporada seca, es posible que el suelo se seque y la recarga sea mucho más baja, incluso el acuífero saturado como resultado de temporadas lluviosas previas, sea quien recargue las ciénagas, teniendo en cuenta la conexión del agua subterránea con el agua superficial y los flujos regionales identificados por el Grupo de Investigación HYDS (2021). En esta investigación se observó que en la zona sur las ciénagas presentan menor variación pese a presentar mayores precipitaciones, contrario a lo que sucede en las zonas centro y sur, este fenómeno puede ser respuesta a la conexión con los ríos, es decir, las ciénagas con menor variación son las que no muestran conexiones claras con los ríos del AE, lo que concuerda con Jaramillo *et al.* (2015), quien sostiene que los hidroperiodos de las ciénagas conectadas a ríos como el Magdalena son sincrónicos con el ciclo anual del río. Por su parte, el mapa de EVI indica vegetación estable que mantiene y favorece la durabilidad de la ciénaga, así como las inundaciones de los años niña alimenta la conexión del agua superficial y subterránea. Cabe resaltar que en los años los años con fenómeno de la Niña las descargas del río Magdalena son hasta de 12.000 m³/s, lo que hace que este sistema fluvial este muy cercano a considerarse como mega río, que según Morón-Polanco (2016)

corresponden a ríos con descargas promedio mayores de 17000 m³/s y tienden a configurarse como ríos anastomosados

4.4 Evolución del sistema fluvial

En esta discusión se identificó una relación entre los abanicos aluviales y el comportamiento anastomosado del sistema fluvial, de manera que ante la inexistencia de abanicos y por ende no confinamiento del río, este se configuró como río anastomosado. Sin embargo, esta relación es más compleja, puesto que los abanicos se extendieron hasta el cauce del río y en muchos sectores alcanzaron su orilla occidental, lo que ocasionó que el nivel base del lecho del río aumentara, de manera similar al modelo propuesto por Smith y Putnam (1980) en el que abanicos post deglaciación, que fluyeron a través del cauce de los ríos North Saskatchewan, Alexandra y Mistaya, en Canadá, generaron el transporte excesivo en volumen de sedimento, lo que a su vez ocasionó que estos ríos trenzados evolucionaran a ríos anastomosados, debido al cubrimiento o remplazamiento de los canales previos de los sistemas trenzados por una red de canales interconectados, característica de los sistemas anastomosados.

Asimismo, se identificó que en la zona central del AE, el canal más occidental corresponde al canal principal del río Magdalena, ya que presenta las mismas características de río trenzado que mantiene desde la zona sur, pero teniendo en cuenta factores como: 1. El aporte de sedimento y agua de los ríos de la zona sur, en especial el Río Sogamoso, que, aunque actualmente está controlado por hidrosogamoso, anteriormente aportaba un gran volumen de sedimento (García y Añez, 2017); y 2. El cambio en la pendiente y la existencia de espacio de acomodación a partir de la población de San Pablo al Oriente; se desarrolló un nuevo canal sobre la margen derecha del río Magdalena, producto de una avulsión de tercer orden de acuerdo con Makaske (2001), dicho canal nuevo corresponde a un canal meándrico que con el tiempo ha aumentado su sinuosidad, tal como se aprecia en el mapa multitemporal (**ANEXO E**). El canal más oriental también es producto de una avulsión cíclica y según lo observado en las imágenes satelitales con el tiempo se podría hacer perenne; si esto ocurre, se trataría de otra avulsión de tercer orden y se conformaría un tercer canal del río, que podría ser inicialmente recto a levemente sinuoso a meándrico. Es de esperar que el río siga desarrollando avulsiones y distribuyéndose en más canales

sobre la llanura de inundación ubicada al Oriente en la zona central del AE. Adicionalmente, la reactivación de cauces abandonados y su consecuente abandono, puede ser producto de eventos recurrentes.

Como se ha mencionado anteriormente, las avulsiones en el AE se concentran entre los municipios de San Pablo (Bolívar) y Gamarra (Cesar), estas avulsiones conforman el sistema anastomosado del río Magdalena y podrían ser parte de un delta continental elongado, que corresponde a la última etapa del río, antes de su desembocadura en el mar, y que iniciaría en San Pablo. Este delta se desarrolla en un valle semiconfinado entre las Cordilleras Central y Oriental (Nardini *et al.*, 2020), sin embargo, según lo observado en esta investigación por sectores el valle se estrecha o ensancha debido a los abanicos y a la tectónica de la región. Una vez en el VIM, se cambia la configuración del delta y pasa de elongado a lobulado, ya que el valle se amplía a medida que el río se acerca a su desembocadura en el mar. De acuerdo con Tucker (2001) un delta corresponde a la ramificación de un canal principal en varios canales, separados por llanura de inundación y puede haber presencia de lagos y ciénagas, que para el caso del VIM se incrementan, Tucker (2001) también describe que los deltas dominados por ríos tienden a ser elongados, con pocos canales distributarios, *crevasse splays* frecuentes y generalmente se forman cuando la descarga de sedimento es alta y constante, tal como es el caso del Río Magdalena en el AE.

Finalmente, el análisis y la interpretación de los resultados de esta investigación coinciden con lo enunciado en 2012 por Kleinhans *et al.*, quien propuso que el confinamiento de un río, la cohesión de la llanura de inundación, la agradación y la avulsión son factores que controlan la bifurcación en ríos anastomosados.

Siguiendo el modelo propuesto por Smith y Putman (1980) y teniendo en cuenta que las condiciones climáticas durante el Holoceno son muy similares a las actuales, ya que se presentan intervalos secos que se intercalan con otros más húmedos, pero con un aumento gradual de temperatura que produjo la deglaciación de los glaciares de la Cordillera Oriental, de manera que se generaron abanicos aluviales que alcanzaron el

sistema fluvial, el siguiente es el modelo de evolución del sistema fluvial del río Magdalena en el AE:

1. El río Magdalena viene del VSM y VMM como un sistema fluvial trenzado en un valle confinado por las cordilleras central y oriental, en un terreno inclinado, con redes de canales relativamente anchas y poco profundos, separados por barras de sedimento longitudinales y transversales.
2. Generación de abanicos post deglaciación en la Cordillera Oriental durante el Holoceno, que avanzaron en dirección E-W de manera perpendicular al río Magdalena, que en algunos sectores alcanzaron la orilla occidental del río y elevaron el nivel base del lecho del canal principal debido al transporte de volúmenes excesivos de sedimento grueso. En este punto es importante agregar que, en la zona sur pese a la generación de abanicos, se mantuvo el carácter trenzado del río debido al confinamiento del mismo.
3. El desarrollo de llanura de inundación al Oriente del río debido a la inexistencia de abanicos también al Oriente y a que esa área coincide con el depocentro de la cuenca; junto con el aumento del nivel base del lecho en la zona sur y el incremento de sedimento y agua en el río Magdalena producto de la desembocadura de los ríos Cimitarra y Sogamoso, todo en la zona centro, generan varias avulsiones que conducen al desarrollo de un sistema anastomosado en la zona central del AE.
4. El sistema anastomosado de la zona centro se compone por un canal trenzado (el más occidental) y un canal meándrico, una avulsión al Oriente que se alimenta con el río Lebrija (que con el tiempo se puede volver perenne) y varias ciénagas, avulsiones menores y canales abandonados.
5. Finalmente, el avance de los abanicos aluviales en la zona norte, que se interdigitan con el sistema fluvial y asimismo delimitan al norte el sistema anastomosado de la zona centro, también aumenta el nivel base del lecho del cauce y conduce a la generación de dos canales paralelos, que socavan el material de los abanicos que rodean dichos canales y asimismo los mantienen rectos, levemente sinuosos y paralelos.

6. En toda el AE son comunes las avulsiones y las ciénagas debido a la interacción de variables hidro climáticas con el sistema fluvial.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- A través del estudio y la interpretación del componente espacial se analizó la influencia de las condiciones geológicas y geomorfológicas en la dinámica fluvial del río Magdalena, por lo tanto se dividió el AE de acuerdo a cambios observados en el régimen y comportamiento del río, de manera que en la zona sur del AE el Río Magdalena se constituye como un río sinuoso trezado en un valle confinado por los abanicos San Rafael y Sabana de Torres al Este y por la Serranía de San Lucas al Oeste, por su parte en la zona centro, el río Magdalena conforma un sistema anastomosado que incluye avulsiones y ciénagas al Este, y finalmente en la zona norte el río se divide en dos canales trezados sinuosos dentro de un valle confinado por la Serranía de San Lucas al Oeste y los abanicos de Aguachica al Este.
- Mediante la cartografía de unidades y rasgos fluviales se diferenciaron los atributos generados por divagación o sedimentación de los cuerpos de agua superficial, lo que permitió definir características del funcionamiento del sistema fluvial actual del río Magdalena. Se resalta la identificación e interpretación de los *crevasse splays*, las avulsiones y las cicatrices de migración, fueron evidencia para determinar el comportamiento anastomosado del río Magdalena en el AE, que predomina en la zona centro, siendo esta la que presenta mayor variación espacial.
- Es posible que las avulsiones se continúen presentando en el margen oriental del río Magdalena en la zona centro del AE, lo que significaría redistribución del sedimento y caudal en nuevos canales, afectando de esta manera el canal principal

y los demás canales desarrollados anteriormente. Este comportamiento podría incidir en la dinámica antrópica de la mayoría de los centros urbanos del AE, que se ubican al borde del río, por lo tanto, es importante que se contemplen trabajos como este en la gestión del riesgo y la planeación del uso del suelo.

- La tasa de hundimiento de la cuenca si influye en el cambio de la morfodinámica del sistema fluvial, ya que se determinó que el depocentro de la cuenca coincide con la zona centro del AE, lo que facilita el desarrollo de llanura de inundación y la generación de nuevos canales al Oriente del río, factores indispensables para establecer el carácter anastomosado del río Magdalena.
- Se estableció una relación directa entre los abanicos y el comportamiento del río Magdalena en el AE, puesto que el río evoluciona de sistema trezado sinuoso a anastomosado, en ausencia de los abanicos aluviales que confinan el valle del sistema fluvial.
- Se encontró que las fluctuaciones del nivel del río Magdalena se debieron al avance en dirección perpendicular al cauce del río de los abanicos aluviales generados sobre la Cordillera Oriental. Los cuales son producto de deglaciaciones durante el Holoceno. Asimismo, es posible que dichas deglaciaciones pudieran afectar el caudal del río.
- El conjunto de canales en los que se distribuye el río Magdalena junto con las diferentes avulsiones, además de hacer parte del sistema anastomosado del río Magdalena en el AE, podrían conformar un delta continental elongado desarrollado a partir de la población de San Pablo en un valle semiconfinado entre las Cordilleras Central y Oriental, que por sectores se estrecha o ensancha según la ubicación de los abanicos en el AE.
- Con la evaluación e interpretación de imágenes satelitales y el cálculo de índices como el MNDWI, ambos utilizados en la construcción del mapa multitemporal de dinámica fluvial, se determinó que la avulsión generada cerca a la población de San Pablo es cíclica y que el segundo canal del río Magdalena en la zona centro del AE

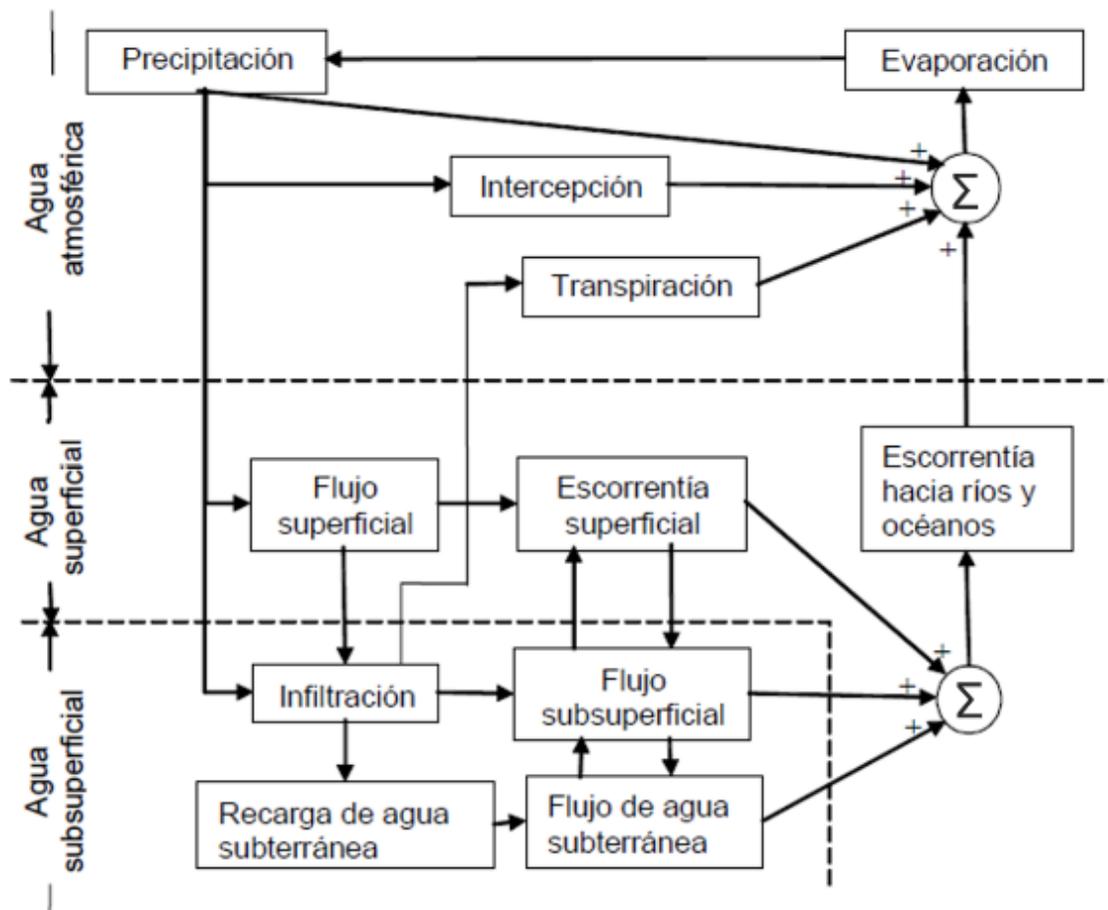
ha incrementado su sinuosidad, dichos hallazgos representan un insumo clave para el entendimiento de la evolución de la morfodinámica del sistema fluvial y el comportamiento del río en las últimas décadas.

- A través del estudio y la interpretación del componente temporal en el AE, se analizó la influencia de las relaciones entre variables hidro-climatológicas con la dinámica fluvial del río Magdalena, que al interpolarlas fue posible asociarlas con la ciclicidad de los eventos climáticos (fenómeno del niño y de la niña) lo que permitió determinar que los factores espacio-temporales descritos en esta investigación se han repetido en un periodo de tiempo que podría extenderse al Holoceno, asimismo se observó que la interacción de las condiciones hidro-climáticas y la conexión del agua subterránea con el agua superficial influyen en la variación del área de los cuerpos de agua superficial, especialmente de las ciénagas ubicadas sobre la llanura de inundación en la zona centro del AE.

A. Anexo: Afluentes del río Magdalena en el AE

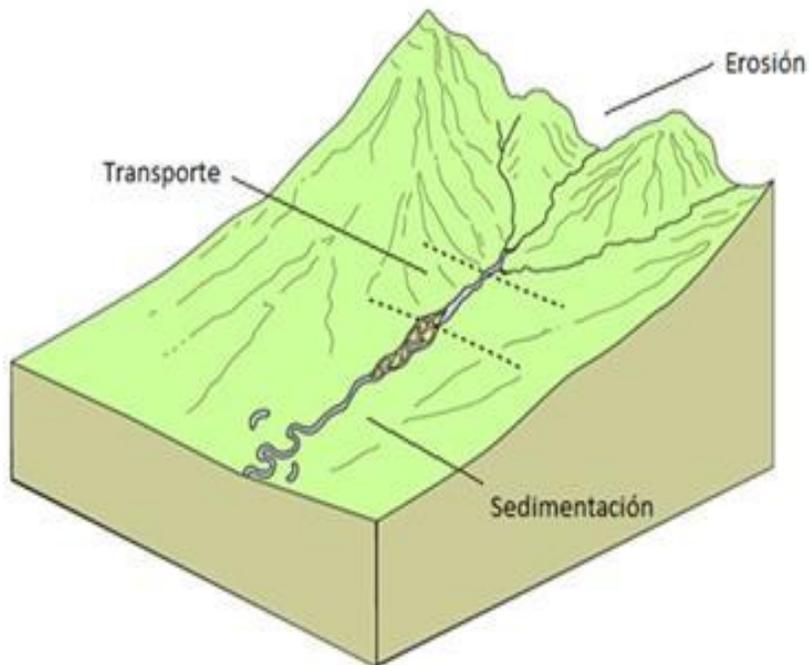
Río	Afluentes			
Río Magdalena	Sogamoso (Caudal 490 m ³ /s)	Suárez	Monquirá	
			Ubasá	
			Lenguaruco	
			Bartolomé (Obita)	
			Fonce	Taquizá
		Chicamocha	Chiquito	
			Minas	
			Nevado	
			Servitá	Tunebo
			Onzaga	
		Guaca		
	Cimitarra (Caudal 524 m ³ /s)			
	Simití (5,5 m ³ /s)	Taracué		
		Boque	Inanea	
		Platanal		
Lebrija (300 m ³ /s)	Cáchira del Sur			
	Río de Oro			
	Cáchira	San Alberto		
Brazo Morales	La Honda			
	Arenal			
	Simana El Carmen			

B. Anexo: Ciclo hidrológico



Representación esquemática clásica del ciclo del agua.

C. Anexo: Proceso dominante del río según ubicación en la cuenca

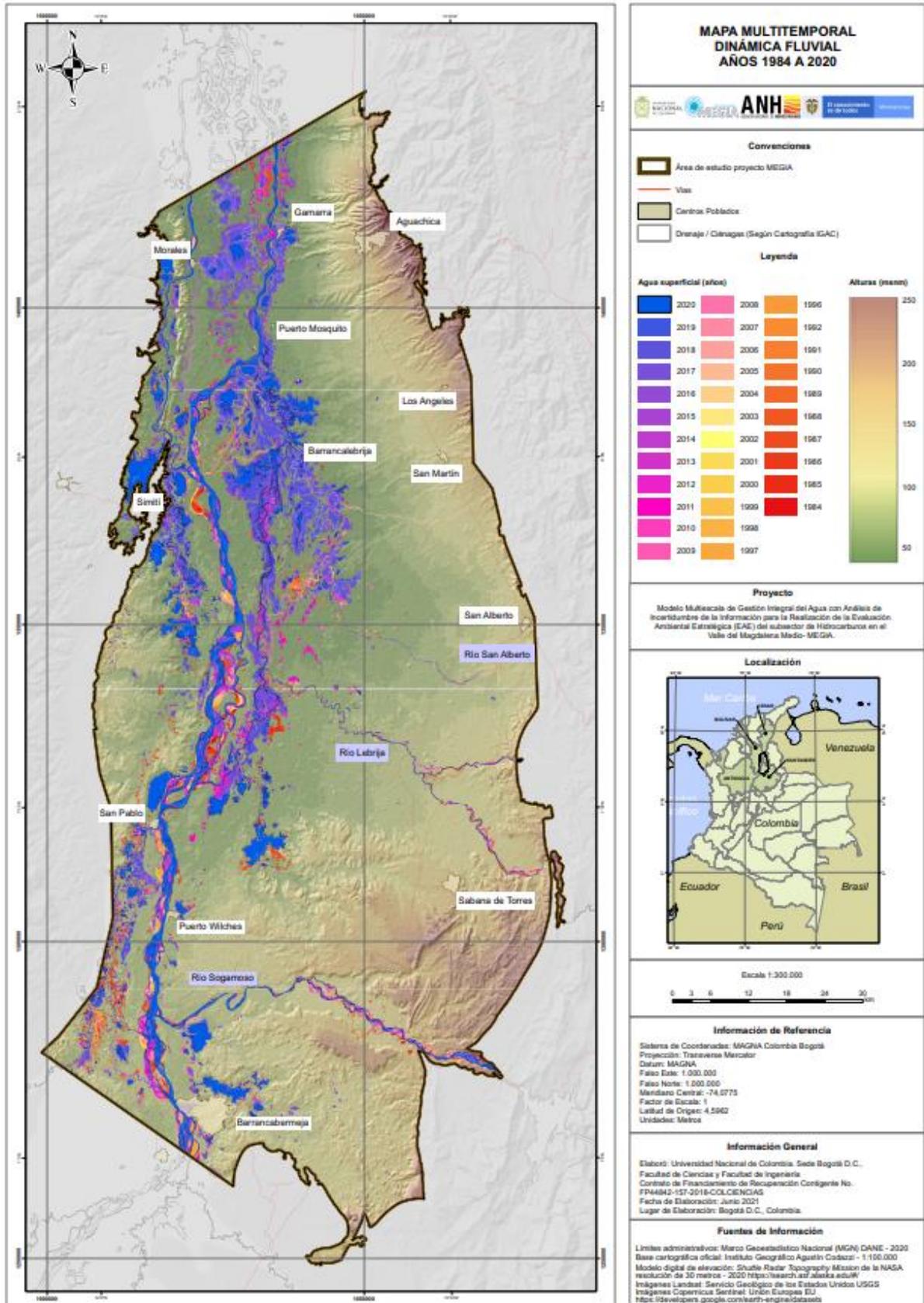


Fuente: Tomado y modificado de: Nichols, G. (2009).

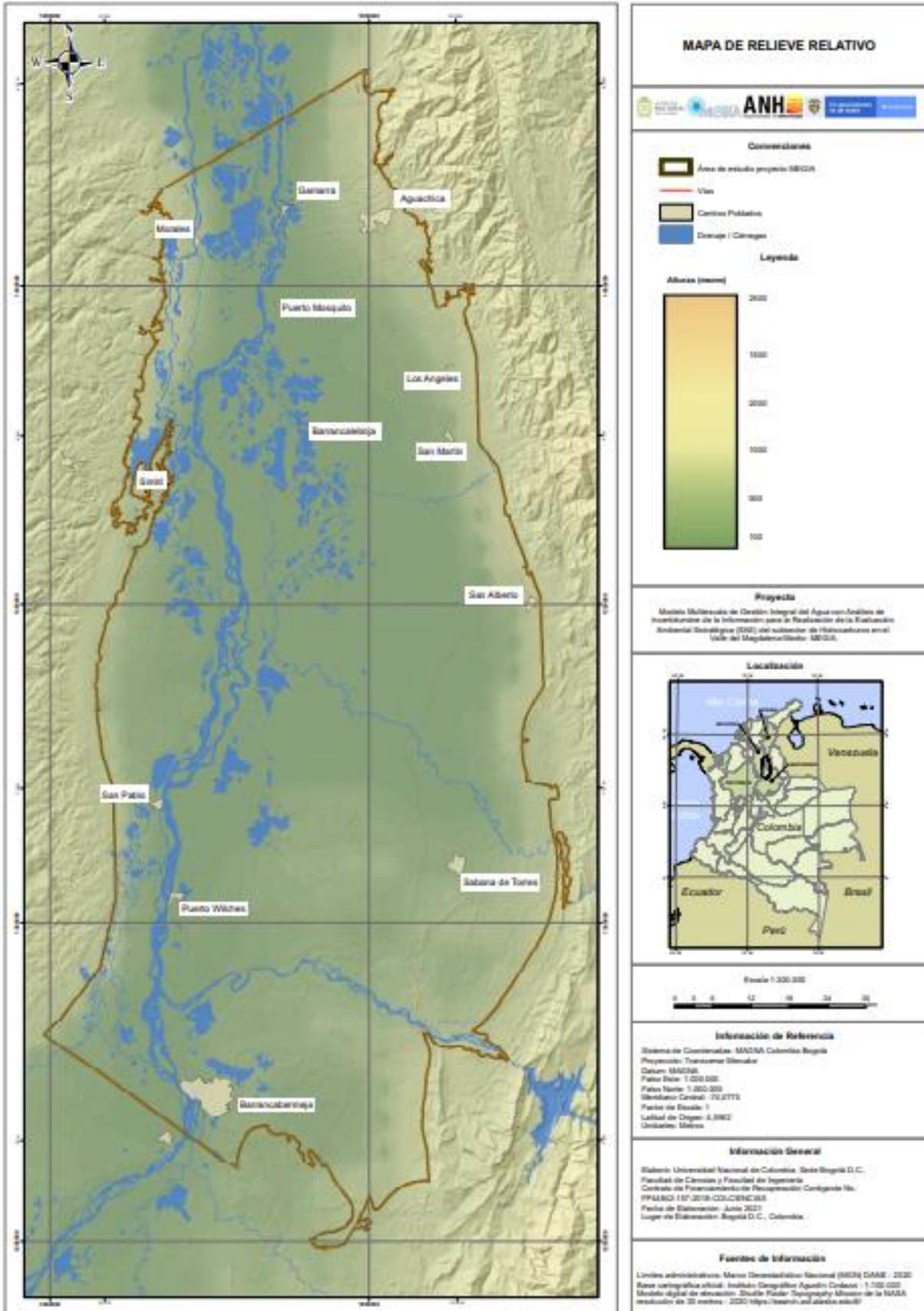
D. Anexo: Características programas Landsat.

Satélite	Landsat 5	Landsat 7	Landsat 8
Periodo de funcionamiento	De marzo 1984 a enero 2013	De abril 1999 a la actualidad	De febrero de 2013 a la actualidad
Sensores	TM y MSS	ETM+	OLI y TIRS
Altura	705 km	705 km	705 km
Inclinación	98.2°	98.2°	98.2°
Resolución espacial	30 m (120 m banda térmica)	30 m (60 m banda térmica y pancromática de 15 m)	30 m (100 m bandas térmicas y pancromática de 15 m)
Rango espectral	0,45 - 12,5 μm	0,45 - 12,5 μm	0,43 - 12,5 μm
Número de bandas	7	8	11
Resolución temporal	16 días	16 días	16 días
Tamaño de imagen	185 km X 172 km	183 km X 170 km	190 km X 180 km
Franja	185 km	183 km	190 km

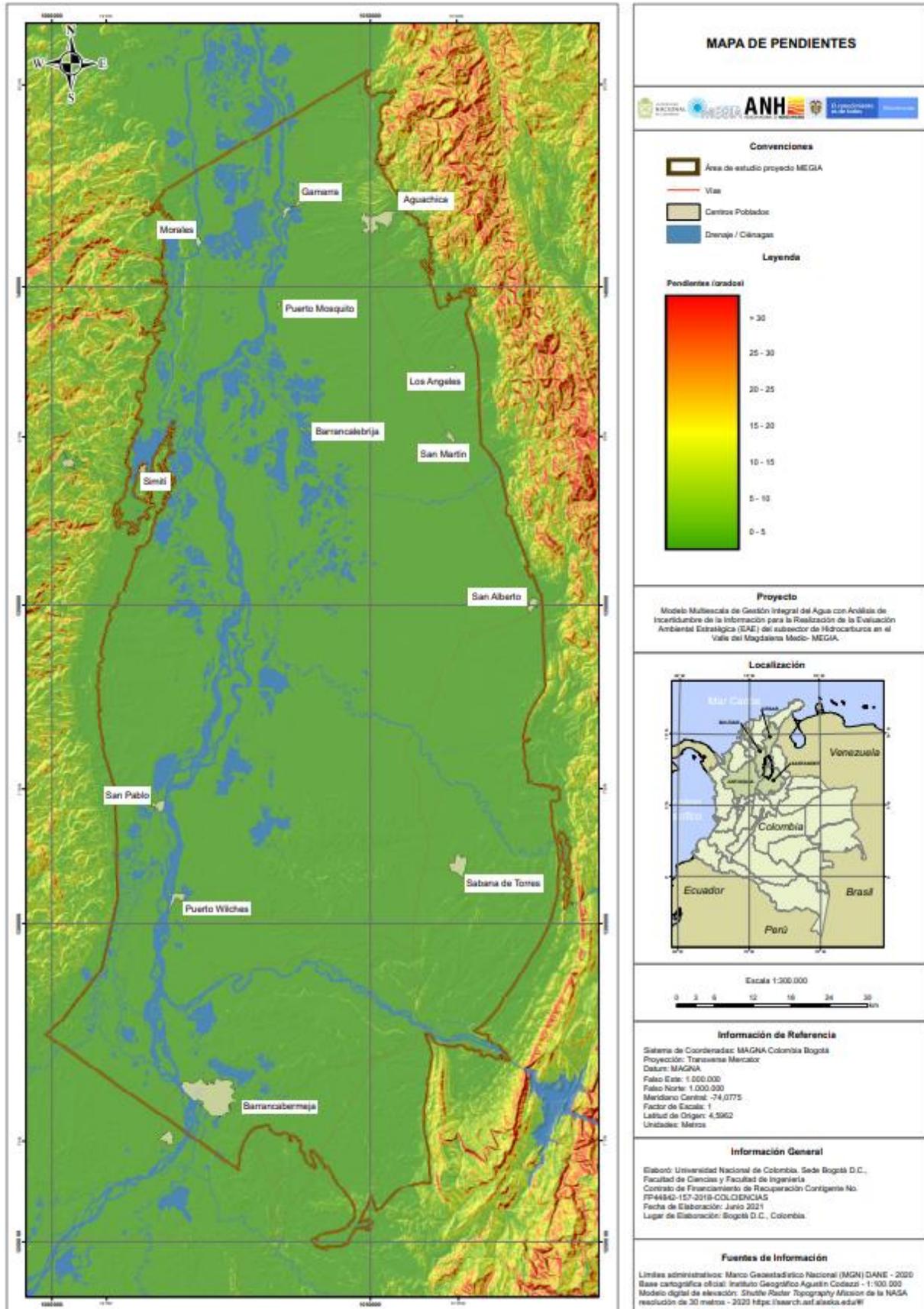
E. Anexo: Mapa multitemporal de dinámica fluvial - AE



F. Anexo: Mapa de relieve - AE



G. Anexo: Mapa de pendientes - AE



MAPA DE PENDIENTES

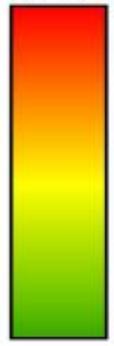


Convenciones

- Área de estudio proyecto MEGIA
- Vías
- Centros Poblados
- Drenaje / Ciénagas

Legenda

Pendientes (arados)



Proyecto

Modelo Multiescala de Gestión Integral del Agua con Análisis de Incertidumbre de la Información para la Realización de la Evaluación Ambiental Estratégica (EAE) del subsector de Hidrocarburos en el Valle del Magdalena Medio- MEGIA.

Localización



Escala 1:200,000



Información de Referencia

Sistema de Coordenadas: MAGNA Colombia Bogotá
 Proyección: Transversa Mercator
 Datum: MAGNA
 Falso Este: 1.000.000
 Falso Norte: 1.000.000
 Meridiano Central: -74,0775
 Factor de Escala: 1
 Latitud de Origen: 4,5602
 Unidades: Metros

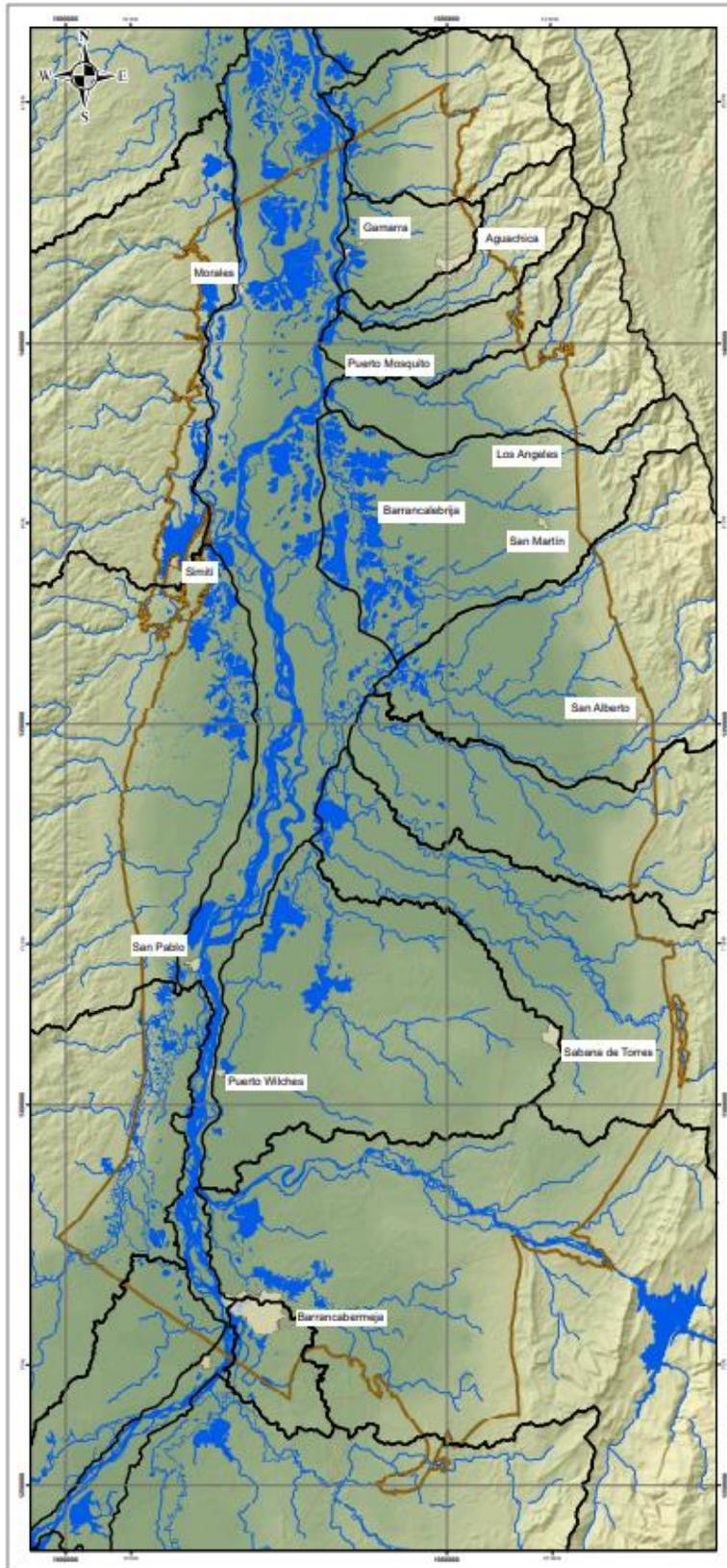
Información General

Elaboró: Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá D.C., Facultad de Ciencias y Facultad de Ingeniería
 Contrato de Financiamiento de Recuperación Contingente No. PP44840-157-2019-COLCIENCIAS
 Fecha de Elaboración: Junio 2021
 Lugar de Elaboración: Bogotá D.C., Colombia.

Fuentes de Información

Límites administrativos: Marco Geoadministrativo Nacional (MGN) DANE - 2020
 Base cartográfica oficial: Instituto Geográfico Agustín Codazzi - 1:500.000
 Modelo digital de elevación: Shuttle Radar Topography Mission de la NASA
 resolución de 30 metros - 2020 <http://search.asf.alaska.edu/>

H. Anexo: Mapa de cuencas - AE



MAPA DE DRENAJE Y CUENCAS HIDROLÓGICAS

Convenciones

- Área de estudio proyecto MEGA
- Vías
- Centros Poblados
- Drenaje / Ciénagas

Legenda

Cuenca Hidrológica

Alturas (metros)

Proyecto

Modelo Multiescala de Gestión Integral del Agua con Análisis de Incidencia de la Información para la Realización de la Evaluación Ambiental Estratégica (EAE) del subsector de Hidrocarburos en el Valle del Magdalena Medio- MEGA.

Localización

Escala 1:300.000

Información de Referencia

Sistema de Coordenadas: MAGNA Colombia Bogotá
 Proyección: Transversa Mercator
 Datum: MAGNA
 Falso Este: 1.000.000
 Falso Norte: 1.000.000
 Meridiano Central: -74.0775
 Factor de Escala: 1
 Latitud de Origen: 4.5602
 Unidades: Metros

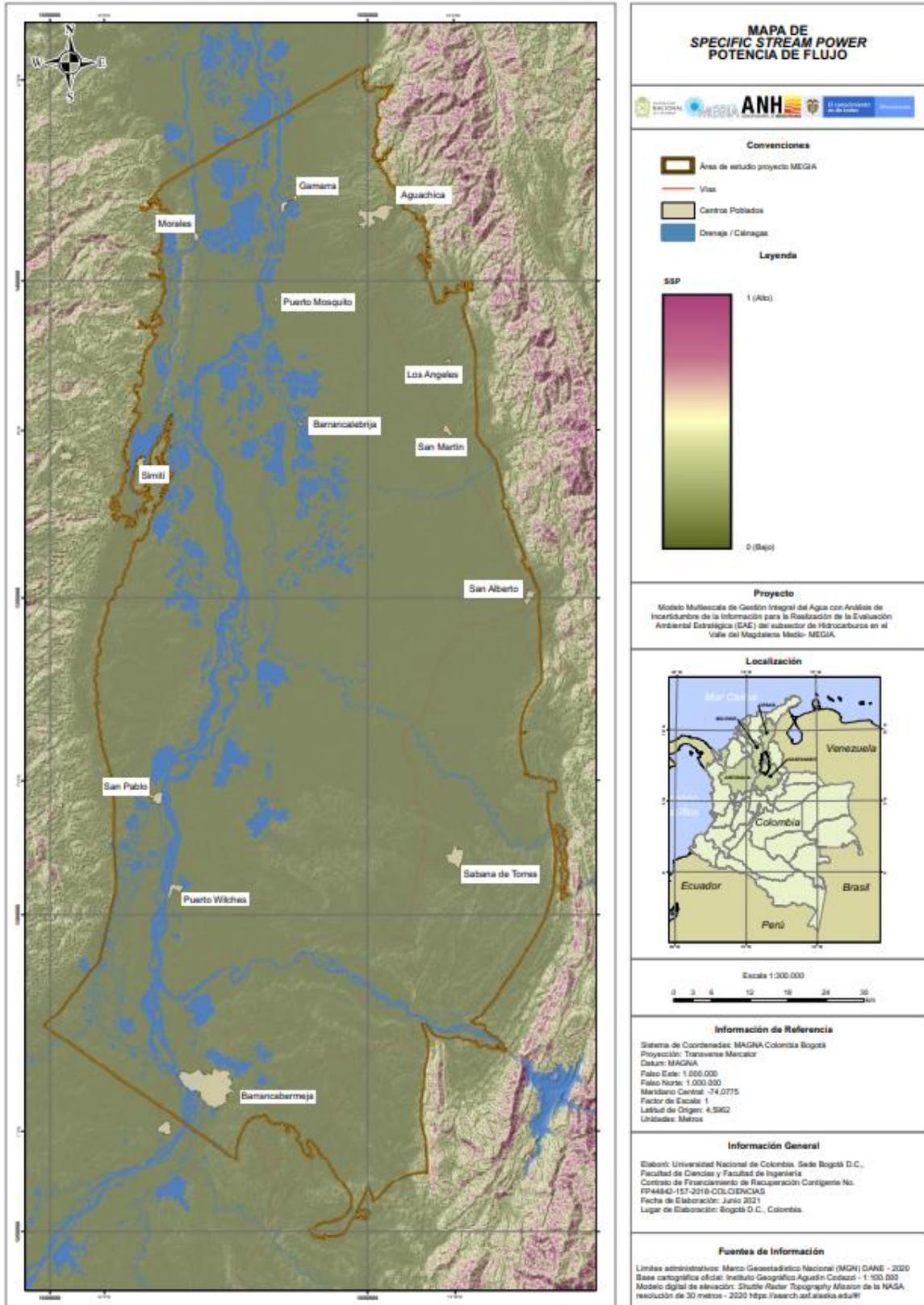
Información General

Elaboró: Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá D.C., Facultad de Ciencias y Facultad de Ingeniería
 Centro de Financiamiento de Recuperación Contingente No. FP44842-157-3018-COLOCIENCIAS
 Fecha de Elaboración: Junio 2021
 Lugar de Elaboración: Bogotá D.C., Colombia.

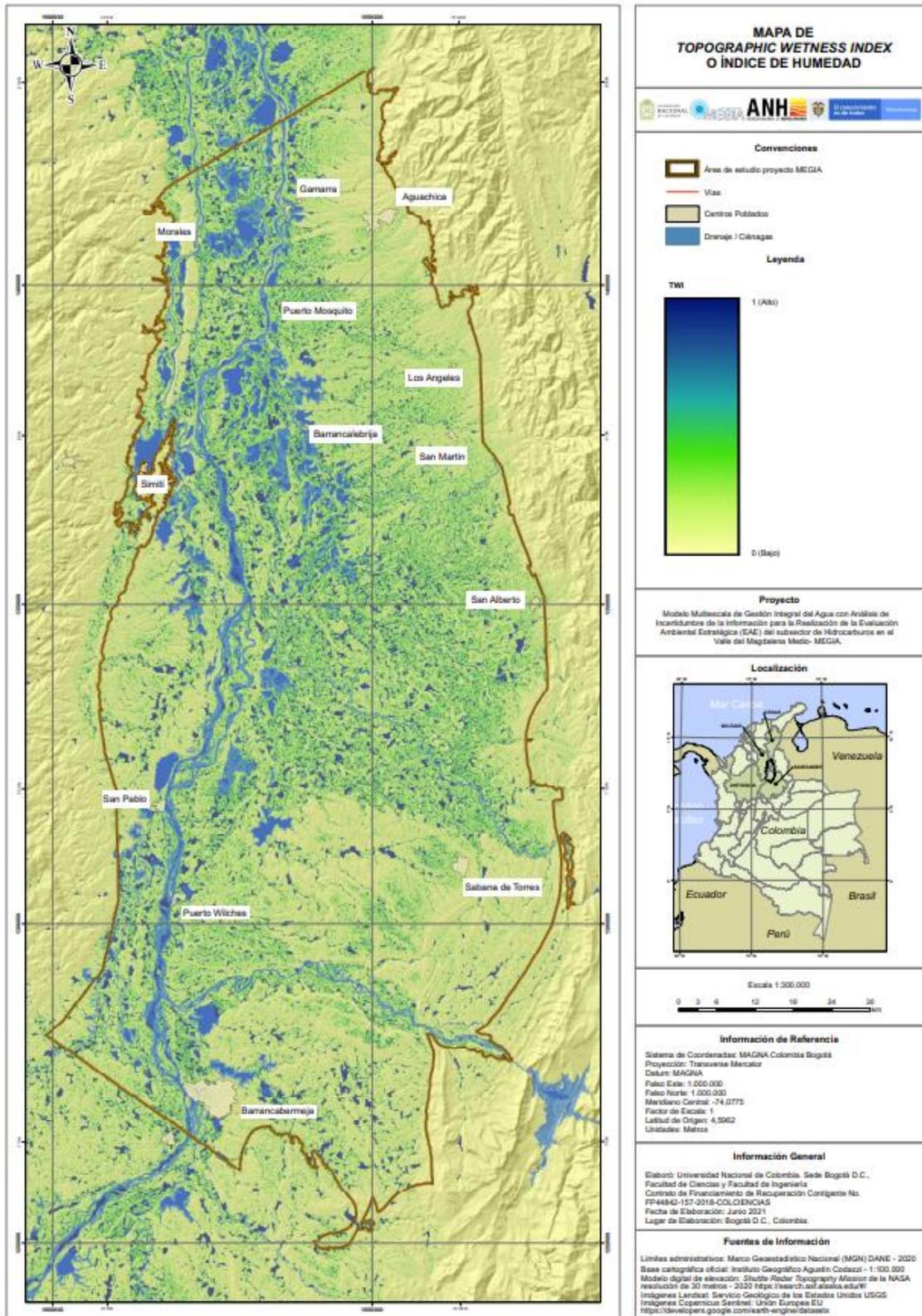
Fuentes de Información

Límites administrativos: Marco Geográfico Nacional (MGN) DANE - 2020
 Base cartográfica oficial: Instituto Geográfico Agustín Codazzi - 1:100.000
 Modelo digital de elevación: Shuttle Radar Topography Mission de la NASA, resolución de 30 metros - 2020 <https://search.saf.alaska.edu/>

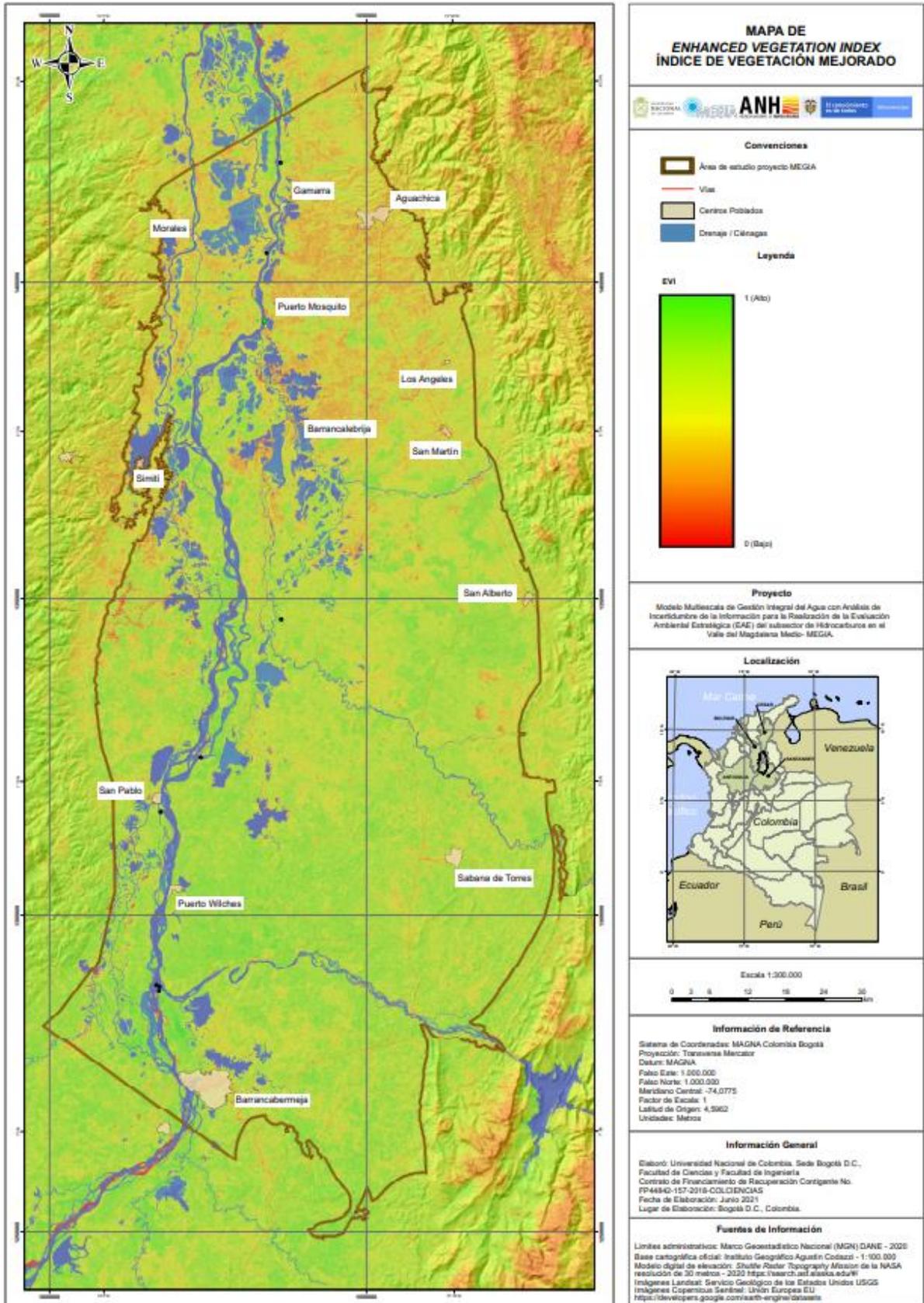
I. Anexo: Mapa de SSP - AE



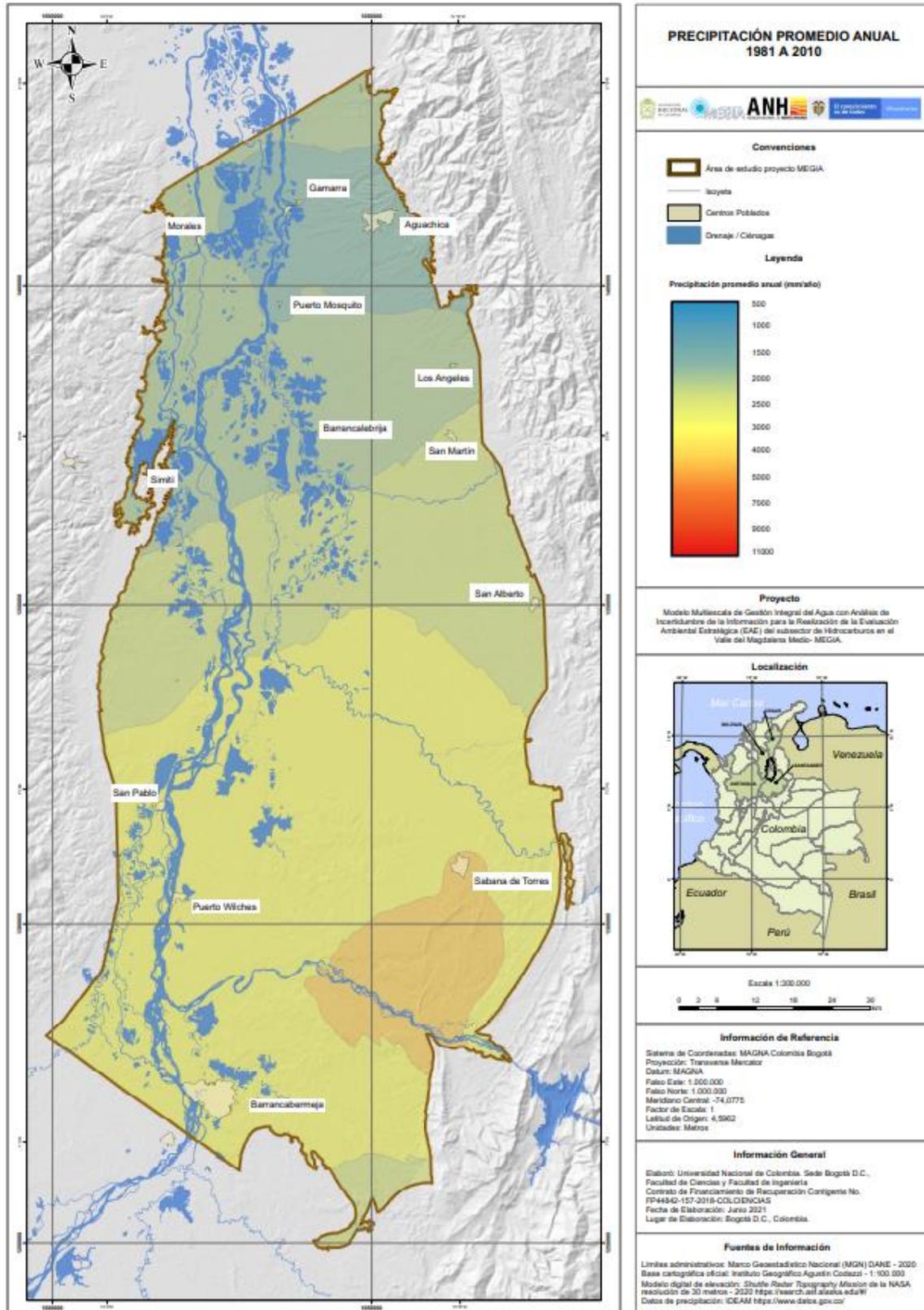
J. Anexo: Mapa de TWI en el AE



K. Anexo: Mapa de EVI en el AE



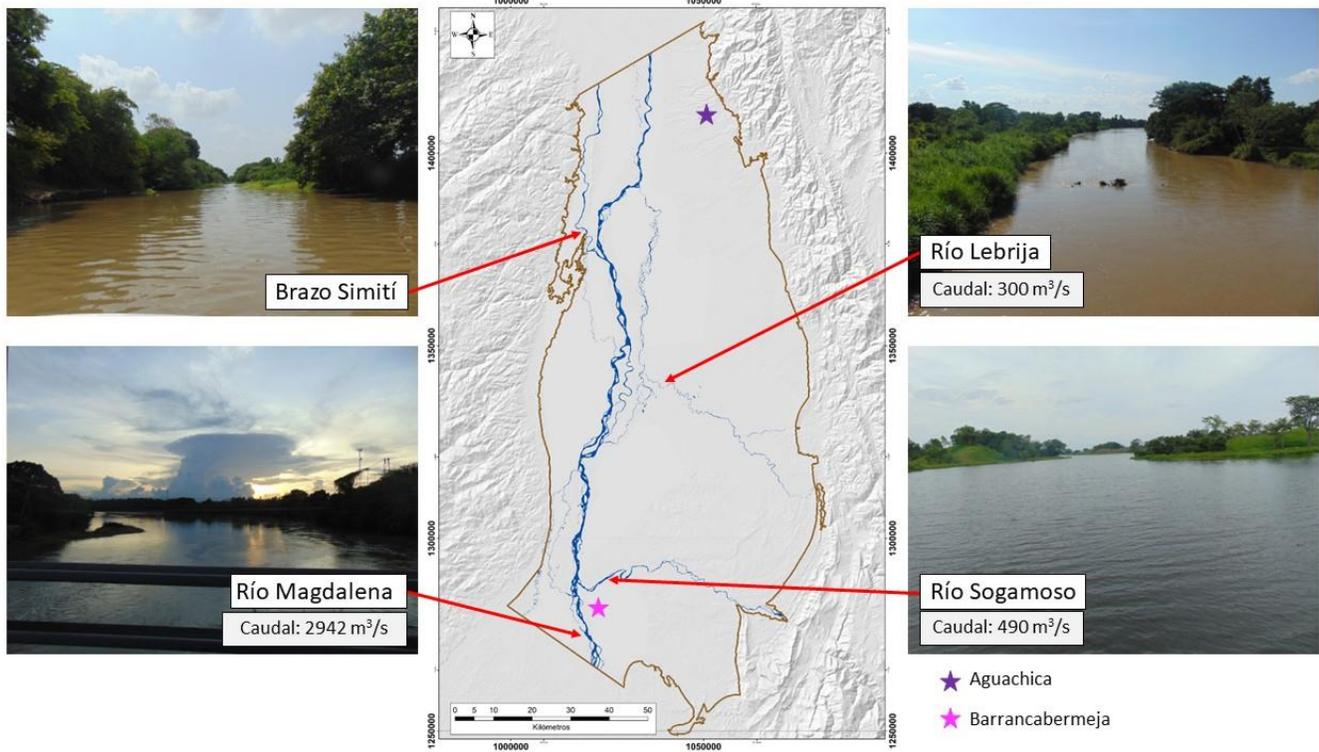
L. Anexo: Mapa de precipitación en el AE



M. Anexo: VALORES ONI

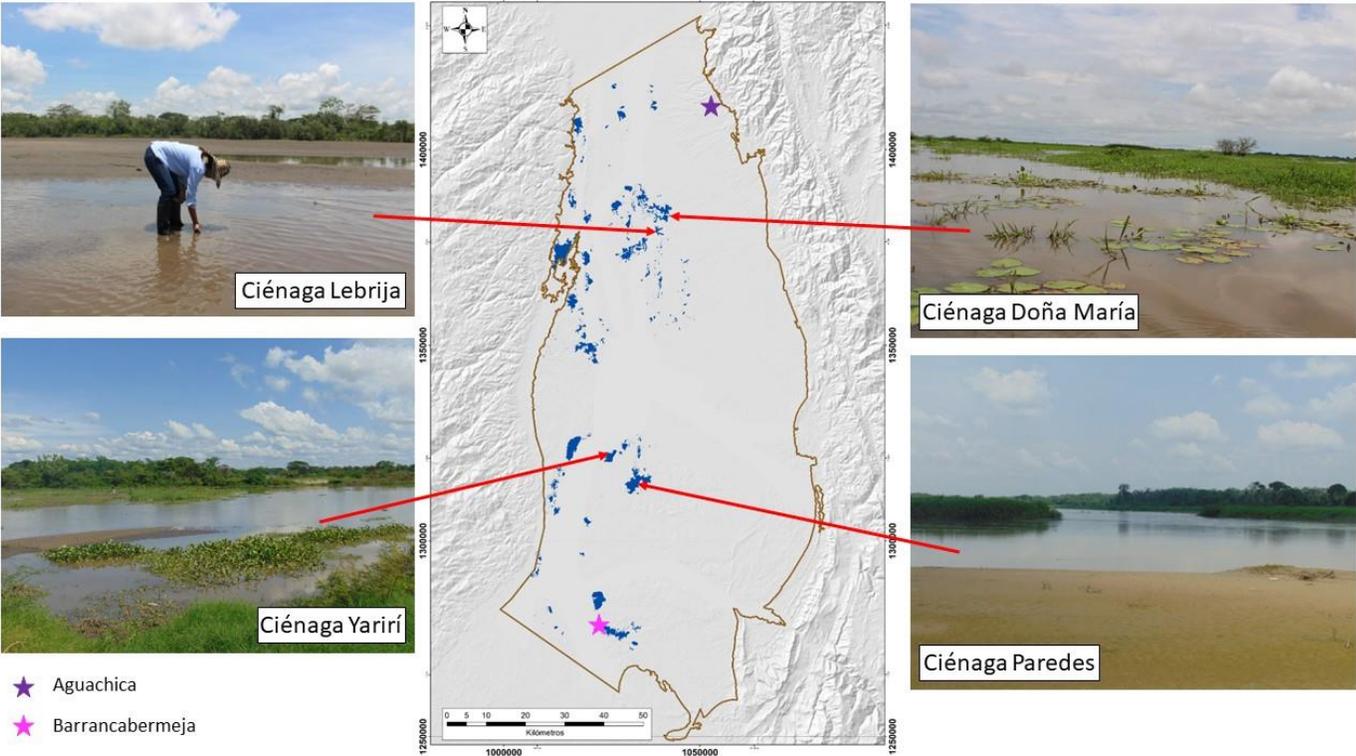
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1980	0.6	0.5	0.3	0.4	0.5	0.5	0.3	0.0	-0.1	0.0	0.1	0.0
1981	-0.3	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	-0.2	-0.1
1982	0.0	0.1	0.2	0.5	0.7	0.7	0.8	1.1	1.6	2.0	2.2	2.2
1983	2.2	1.9	1.5	1.3	1.1	0.7	0.3	-0.1	-0.5	-0.8	-1.0	-0.9
1984	-0.6	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.6	-0.9	-1.1
1985	-1.0	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.6	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4
1986	-0.5	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.2	0.4	0.7	0.9	1.1	1.2
1987	1.2	1.2	1.1	0.9	1.0	1.2	1.5	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1
1988	0.8	0.5	0.1	-0.3	-0.9	-1.3	-1.3	-1.1	-1.2	-1.5	-1.8	-1.8
1989	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1990	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4
1991	0.4	0.3	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.6	0.6	0.8	1.2	1.5
1992	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1	0.7	0.4	0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.1
1993	0.1	0.3	0.5	0.7	0.7	0.6	0.3	0.3	0.2	0.1	0.0	0.1
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.7	1.0	1.1
1995	1.0	0.7	0.5	0.3	0.1	0.0	-0.2	-0.5	-0.8	-1.0	-1.0	-1.0
1996	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5
1997	-0.5	-0.4	-0.1	0.3	0.8	1.2	1.6	1.9	2.1	2.3	2.4	2.4
1998	2.2	1.9	1.4	1.0	0.5	-0.1	-0.8	-1.1	-1.3	-1.4	-1.5	-1.6
1999	-1.5	-1.3	-1.1	-1.0	-1.0	-1.0	-1.1	-1.1	-1.2	-1.3	-1.5	-1.7
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2000	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7
2001	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
2002	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.1
2003	0.9	0.6	0.4	0.0	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
2006	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.1	0.0	0.1	0.3	0.5	0.8	0.9	0.9
2007	0.7	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.1	-1.3	-1.5	-1.6
2008	-1.6	-1.5	-1.3	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	-0.2	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.8	-0.8	-0.6	-0.3	0.0	0.3	0.5	0.6	0.7	1.0	1.4	1.6
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2010	1.5	1.2	0.8	0.4	-0.2	-0.7	-1.0	-1.3	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6
2011	-1.4	-1.2	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.0	-1.1	-1.0
2012	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.2
2013	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7
2015	0.5	0.5	0.5	0.7	0.9	1.2	1.5	1.9	2.2	2.4	2.6	2.6
2016	2.5	2.1	1.6	0.9	0.4	-0.1	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	-0.1	-0.4	-0.7	-0.8	-1.0
2018	-0.9	-0.9	-0.7	-0.5	-0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.8
2019	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2020	0.5	0.5	0.4	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.6	-0.9	-1.2	-1.3	-1.2
2021	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.5	-0.7	-0.8	-1.0	-1.0
2022	-1.0	-0.9	-1.0	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.9	-1.0	-1.0	-0.9	

N. Anexo: Canales activos



Fuente: Elaboración propia.

O. Anexo: Lagunas y ciénagas



Fuente: Elaboración propia.

P. ANEXO: Barras de sedimento

Tamaño de grano: lodo



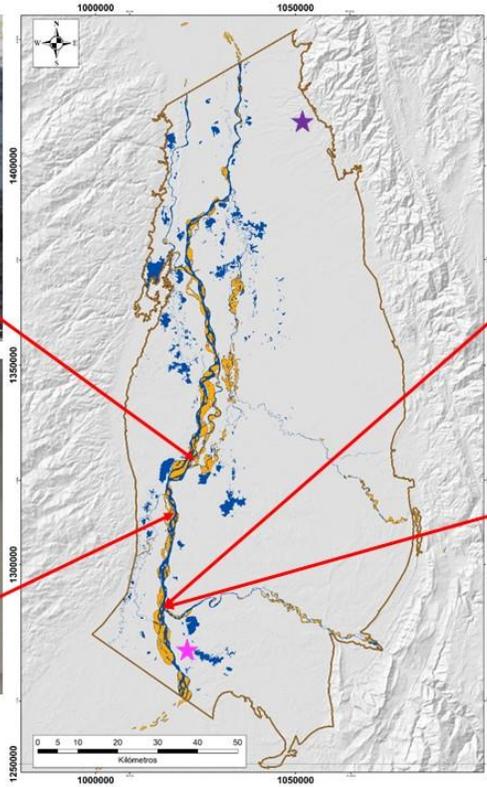
Tamaño de grano: arena fina



Tamaño de grano: arena media



Tamaño de grano: arena media



- ★ Aguachica
- ★ Barrancabermeja

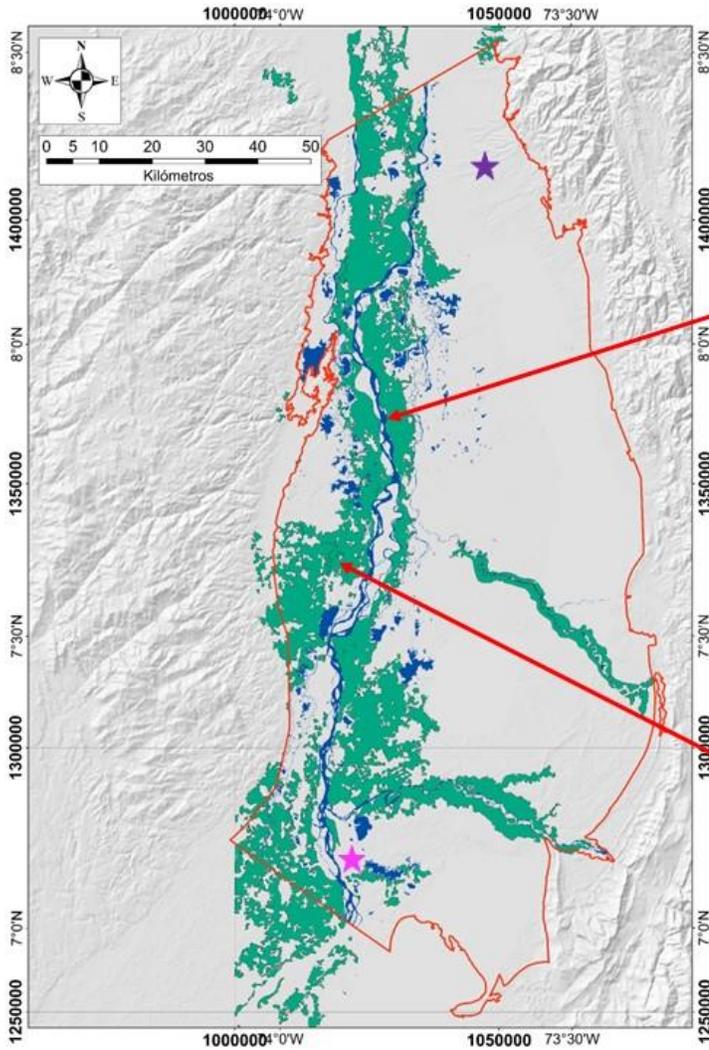
Fuente: Elaboración propia.

Q. ANEXO: Dique natural



Fuente: Elaboración propia.

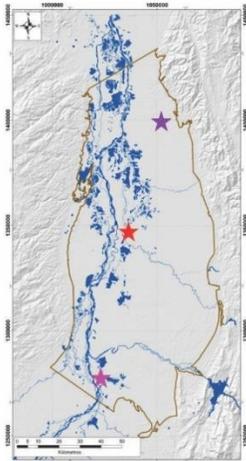
R. ANEXO: Llanura inundación proximal



- ★ Aguachica
- ★ Barrancabermeja

Fuente: Elaboración propia.

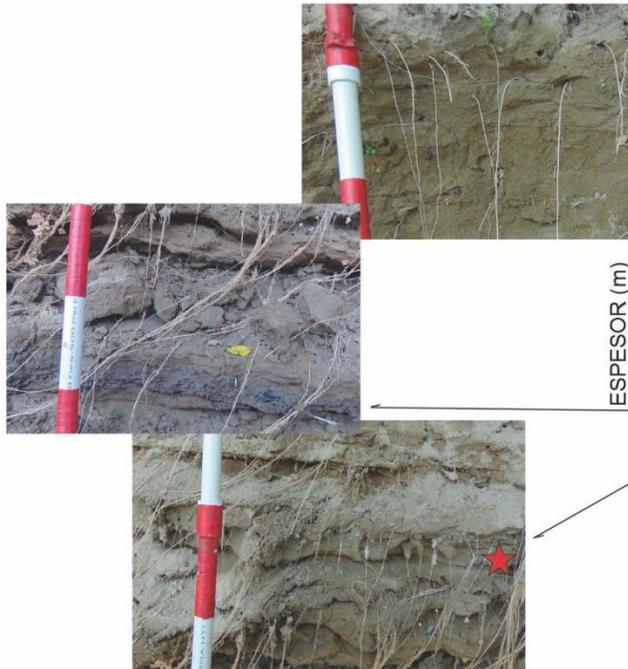
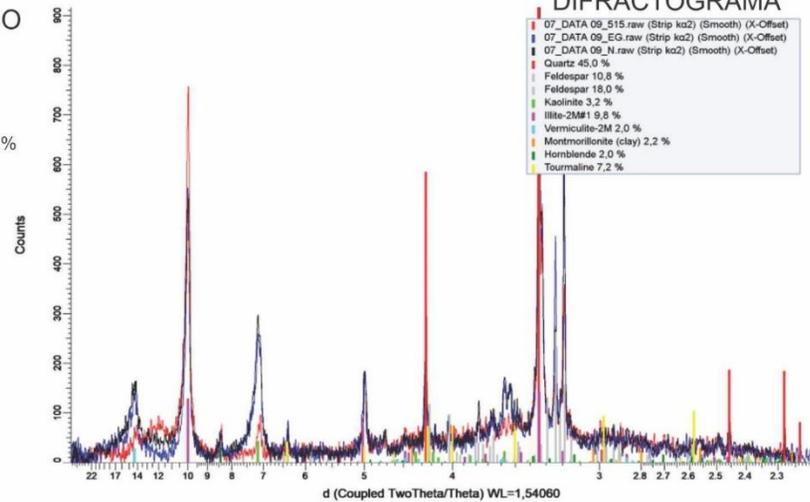
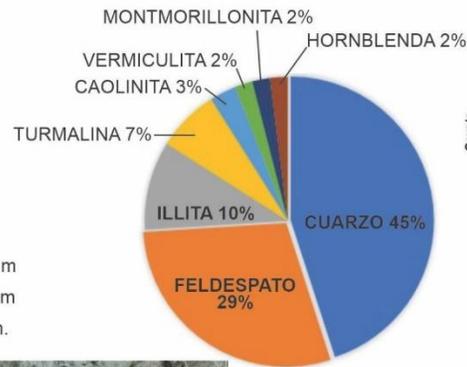
S. ANEXO: Columna estratigráfica llanura inundación proximal



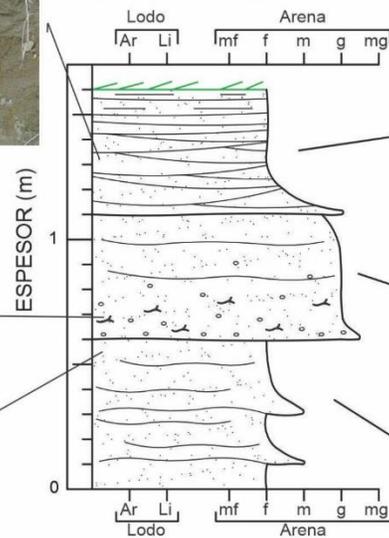
★ Aguachica
★ Barrancabermeja
★ Data 09

X: 1.034.268 m
 Y: 1.343.017 m
 Z: 54 m.s.n.m.

CONTENIDO MINERALÓGICO



GRANULOMETRÍA



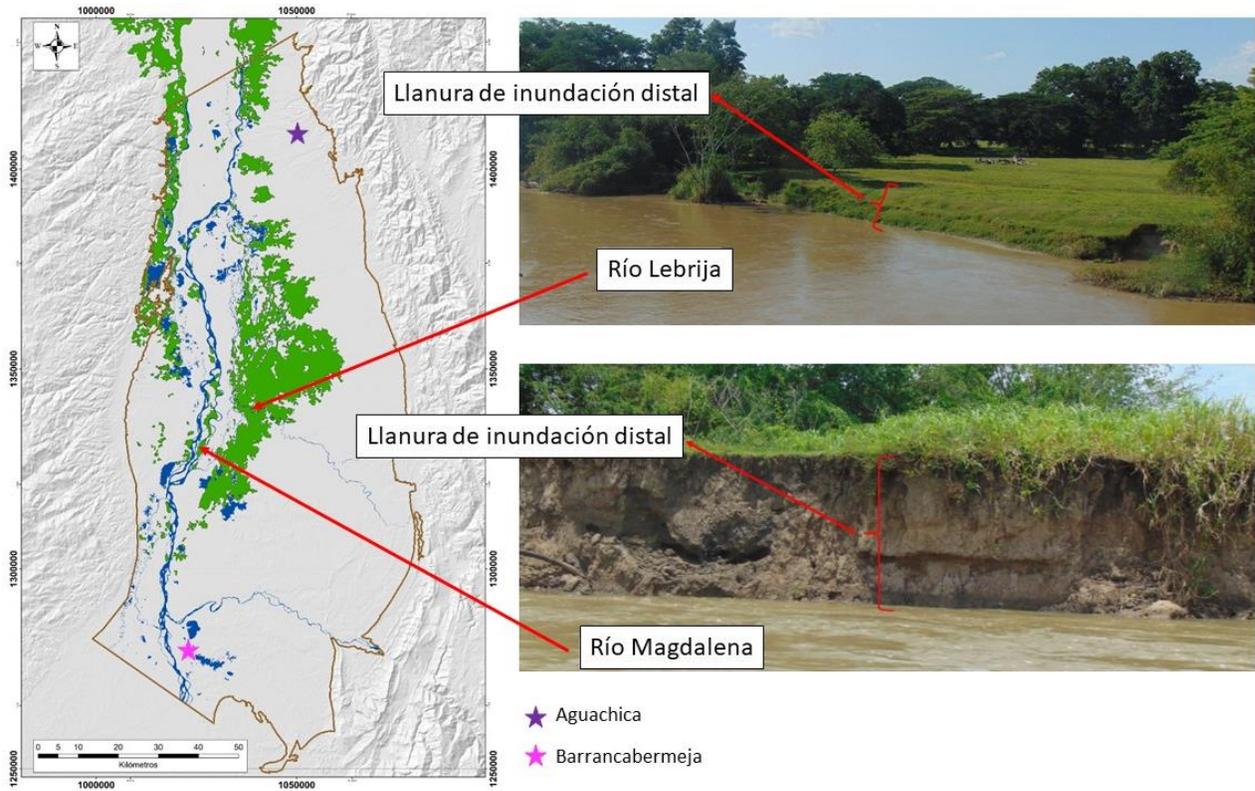
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA

Capa gruesa de 50 cm de espesor, de arenas no consolidadas, con granoderecimiento de arena gruesa a fina, con granos de cuarzo, feldespatos, arcillas y opacos, con baja esfericidad, redondeados y bien sorteados. Capa de color marrón amarillenta, subtabular con estratificación cruzada hacia la base, gradando a planoparalela hacia el techo.

Capa gruesa de 50 cm de espesor, de arenas no consolidadas, con granoderecimiento de arena muy gruesa a media, con granos de cuarzo, feldespatos, arcillas y opacos, con baja esfericidad, redondeados y bien sorteados. Capa de color marrón, subtabular con estratificación ondulosa a irregular, en la base de la capa hay fragmentos de troncos e intraclastos entre granos de arena gruesa, correspondientes a depósitos de fondo de canal.

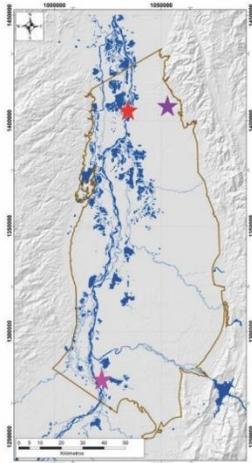
Sucesión de capas medias de 20 cm de espesor, con granoderecimiento de arenas medias a finas, no consolidadas, con granos de cuarzo, feldespatos, arcillas y opacos, con baja esfericidad, redondeados y bien sorteados. Capas grises amarillentas, subtabulares con siluetas de estratificación ondulosa.

T. ANEXO: Llanura inundación distal



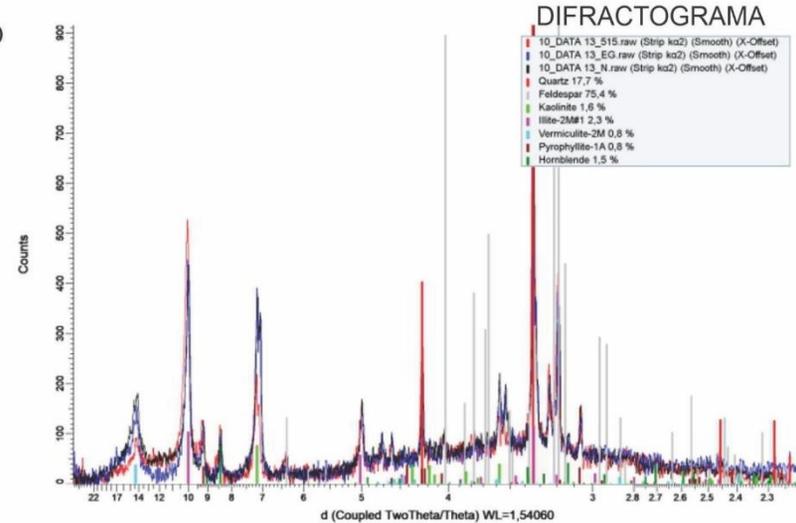
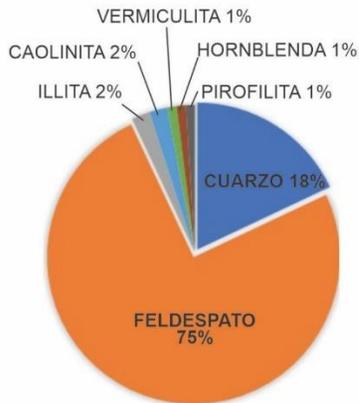
Fuente: Elaboración propia.

U. ANEXO: Columna estratigráfica llanura inundación proximal

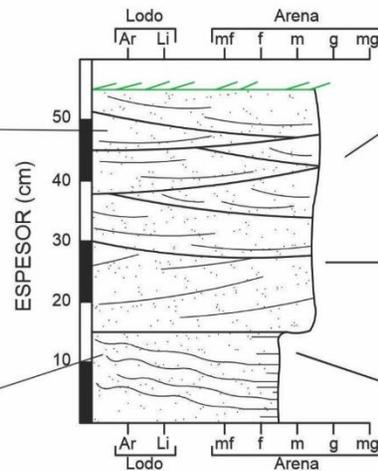


X: 1.035.705 m
 Y: 1.413.990 m
 Z: 38 m.s.n.m.

CONTENIDO MINERALÓGICO



GRANULOMETRÍA



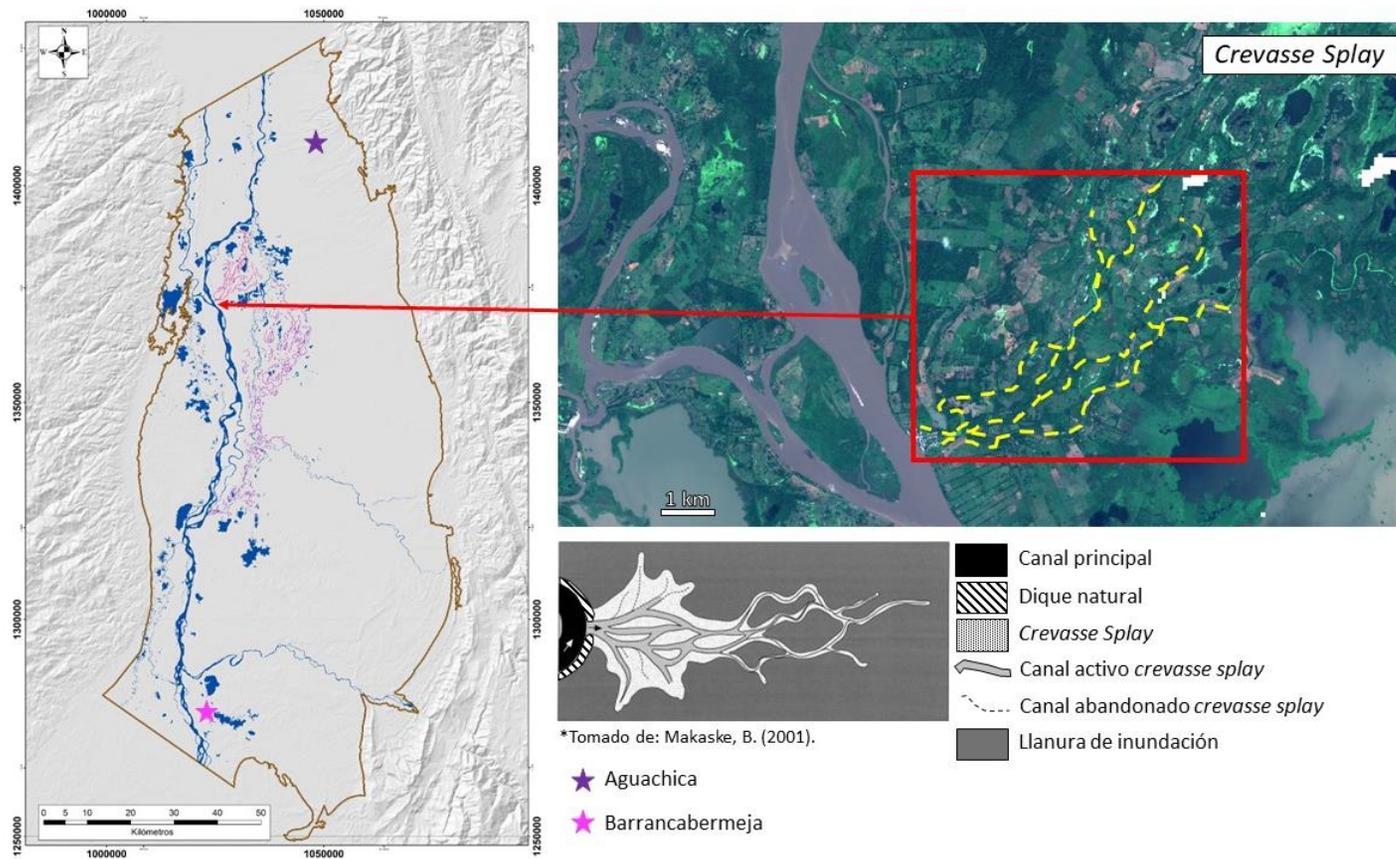
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA

Capa gruesa de ~30 cm de espesor, de arenas medias no consolidadas, con granos de cuarzo, feldespato, arcillas, micas y opacos, con esfericidad alta, subredondeados y bien sorteados, capa de color gris, subtabular a tabular con estratificación cruzada en artesa.

Capa media de ~15 cm de espesor, de arenas finas a medias no consolidadas, con granos de cuarzo, feldespato, arcillas y opacos, con esfericidad alta, subangulosos a subredondeados y bien sorteados, capa de color gris, sub tabular con siluetas de estratificación cruzada planar.

Capa media de ~15 cm de espesor, de arenas finas a medias no consolidadas, con granos de cuarzo, feldespato, arcillas, micas y opacos, con esfericidad alta, subangulosos a subredondeados y bien sorteados, capa de color gris, tabular con estratificación plano paralela a ondulosa.

V. ANEXO: *Crevasse splay*



Fuente: Elaboración propia

W. ANEXO: Meandros y cauces abandonados

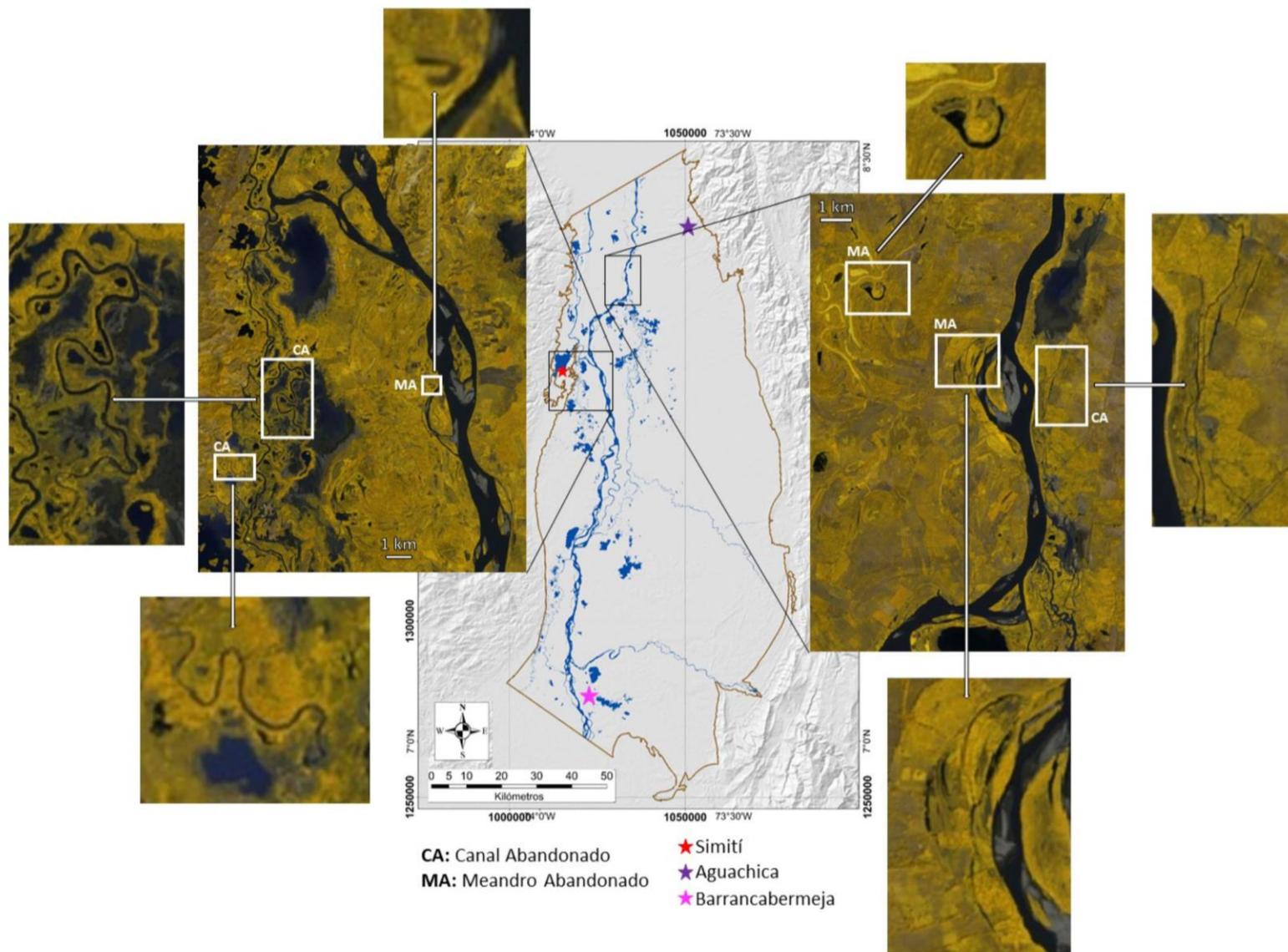
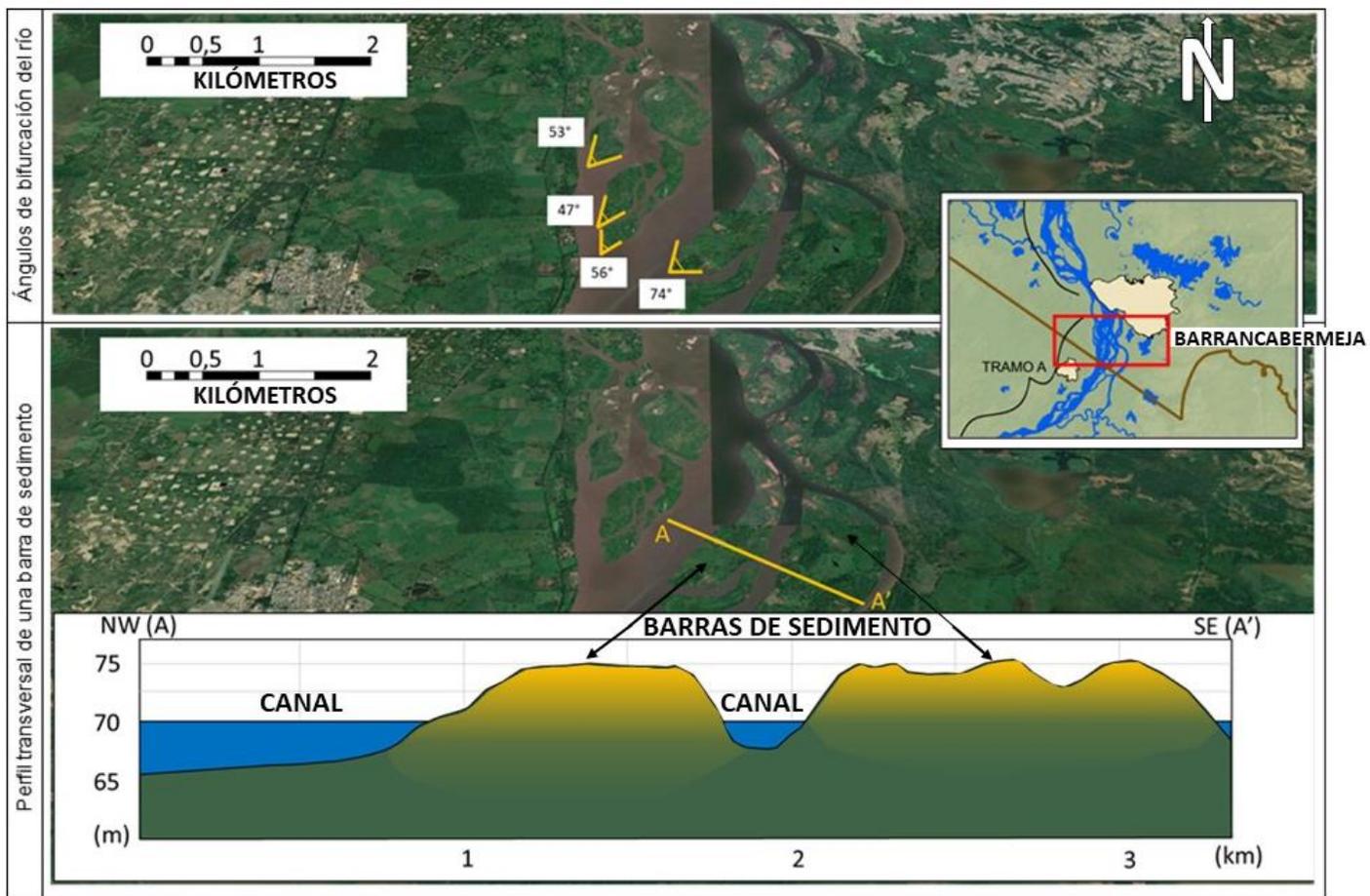


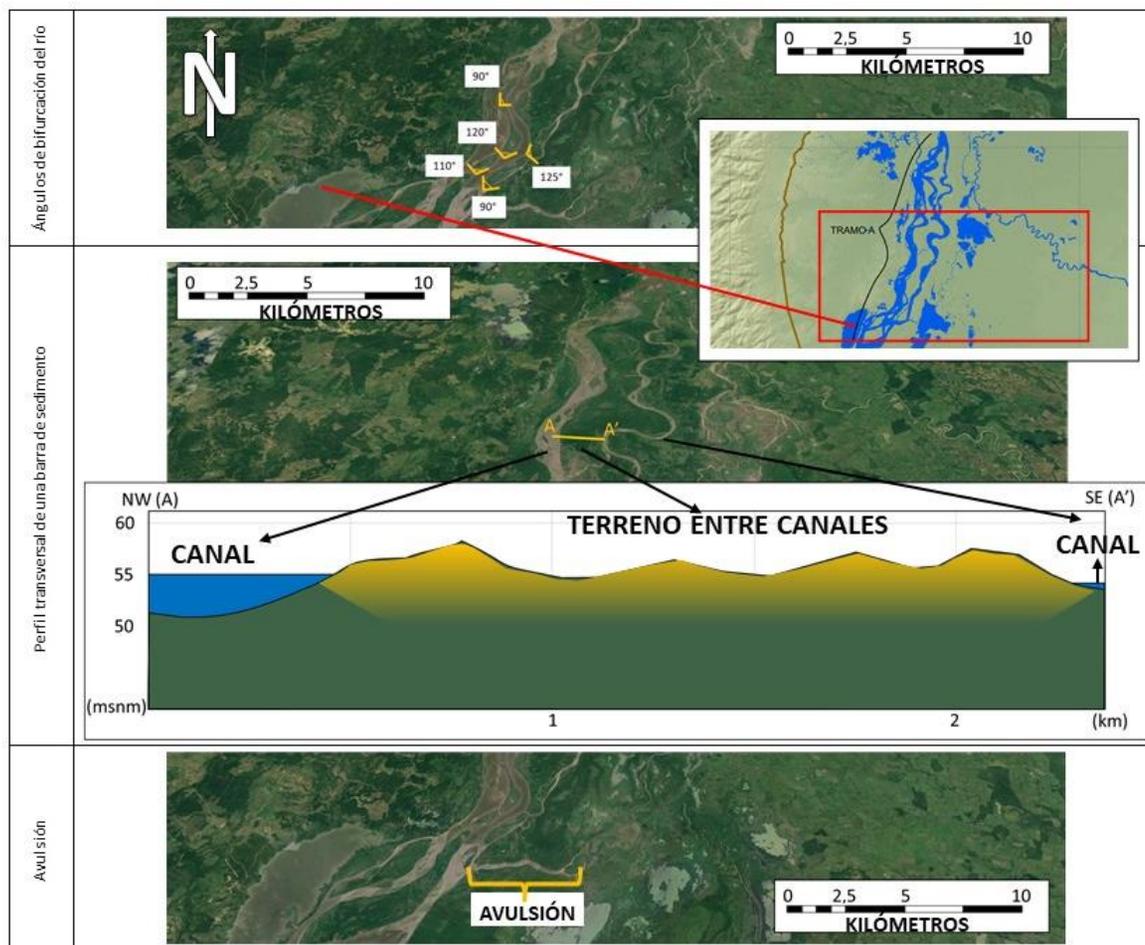
Imagen Sentinel 2 bandas NIR – Red Edge 2 - Red

X. ANEXO: Parámetros barras y canal zona sur.



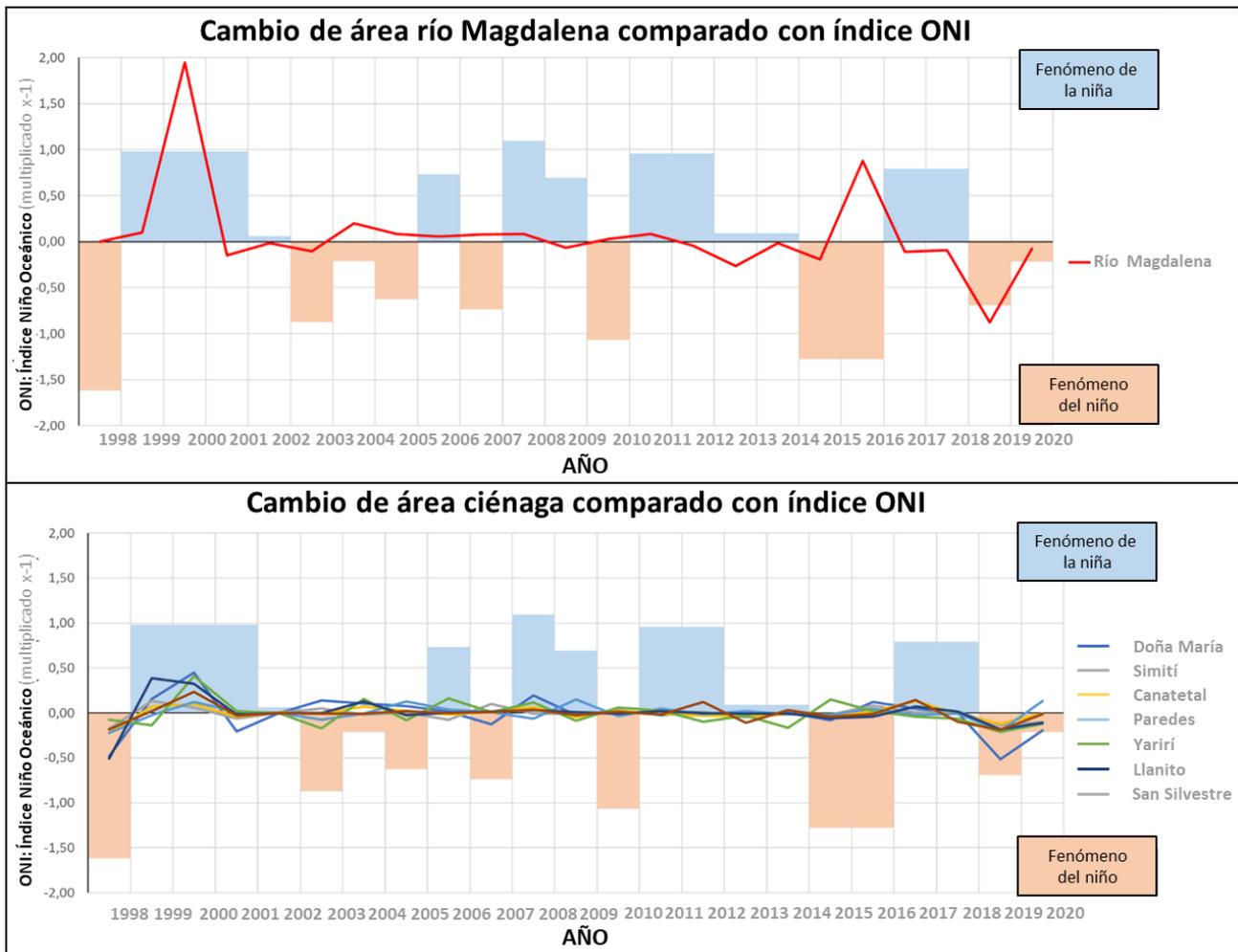
Fuente: Elaboración propia

Y. ANEXO: Parámetros barras y canal zona centro.



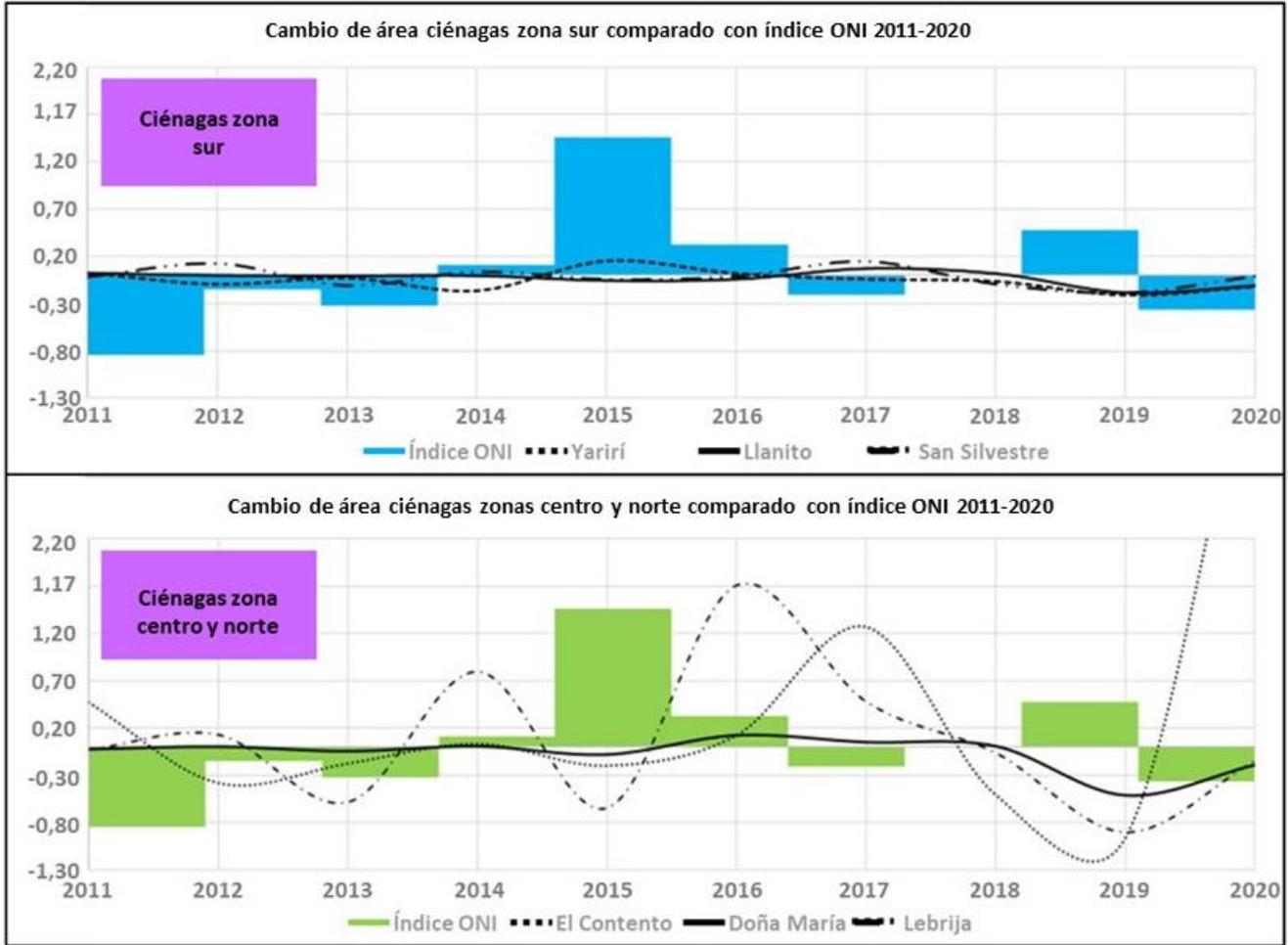
Fuente: Elaboración propia

Z. ANEXO: Área cuerpos de agua vs. ONI



Fuente: Elaboración propia.

AA. ANEXO: Variación área cuerpos de agua (zona sur, centro y norte) vs. ONI



Fuente: Elaboración propia.

Bibliografía

Aceituno, F., Loaiza, N. (2014). Early and Middle Holocene evidence for plant use and cultivation in the Middle Cauca River Basin, Cordillera Central (Colombia). *Quaternary Science Reviews*, 86, 49-62.

Alcántara-Ayala, I. (2000). Índice de susceptibilidad a movimientos del terreno y su aplicación en una región semiárida. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 17 (1), 66-75.

Ángel-Martínez, C. E., Prieto-Gómez, G. A., Cristancho-Mejía, F. (2020). *Modelo geológico-geofísico (escala regional)* Producto 5. Proyecto MEGIA.

Bajjali, W. (2018). *ArcGIS for Environmental and Water Issues*. Gewerbestrasse: Springer.

Benfield, A., Yu, Z., Benavides, J.C. (2021). Environmental controls over Holocene carbon accumulation in *Distichia muscoides*-dominated peatlands in the eastern Andes of Colombia. *Quaternary Science Reviews*, 251.

British Society for Geomorphology, BSG (2015). *10 reasons why geomorphology of wetlands is important*. London, UK.

BSG - British Society for Geomorphology. (2014). *10 reasons why geomorphology is important*. London, UK.

Caballero, M., Peinalba, M.C., Martínez, M., Ortega-Guerrero, B., Vázquez, L. (2005). A Holocene record from a former coastal lagoon in Bahía Kino, Gulf of California, Mexico. *The Holocene*, 15 (8), 1236-1244.

Campbell, C. V. (1967). Lamina, laminaset, bed and bedset. *Sedimentology*, 8, 7-26.

Campos Aranda, D.F. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. México: Universidad Autónoma de San Luis de Potosí, Facultad de Ingeniería.

Cardale de Schrimppff, M., Berrio, J.C., Groot, A.M., Botero, P., Duncan, N. (2019). Culture and the environment on the floodplain of the river Cauca in southwestern Colombia: Reconstructing the evidence from the Late Pleistocene to the Late Holocene. *Quaternary International*, 505, 34-54.

Cardozo, A.Y.V., Ferreira, D., Mendes da Silva, E., Duque, S.R.E., Rangel, J.O.Ch., Sifeddine, A., Turcq., B., Spadano, A.L. (2014). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 415, 127-136.

- Carson, M. A, Kirkby, M. J. (2009). Hillslope Form and Process. *Cambridge: Cambridge University Press*.
- Castillo, M., Lugo-Hubp, J. (2011). Estado actual del conocimiento, clasificación y propuesta de inclusión del término knickpoint en el léxico geológico- geomorfológico del español. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63 (2), 353-364.
- Colombo, F. (2010). Abanicos aluviales: Secuencias y modelos de sedimentación. En Arche, A (ed), *Sedimentología*. Barcelona: Textos Universitarios.
- DNP - Departamento Nacional de Planeación. (2017). *Efectos económicos de futuras sequías en Colombia: Estimación a partir del Fenómeno El Niño 2015*. Dirección de estudios económicos. Bogotá, Colombia.
- Donchyts, G., Baart, F., Winsemius, H., Gorelick, N., Kwadijk, J., & van de Giesen, N. (2016). Earth's Surface water change over the past 30 years. *Nature Climate Change*, 6 (9), 810–813.
- ESRI (2022). EVI. Recuperado de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/arcpy/spatial-analyst/evi.htm>
- European Space Agency, ESA (2015). Sentinel-2 User Handbook. Paris, France.
- Ferguson, R. I., 1987. Accuracy and precision of methods for estimating river loads, *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 95-104.
- Flórez, A. (2003). *Colombia: evolución de sus relieves y modelados*. Bogotá : Universidad Nacional de Colombia, Unilibros.
- García, Y., Añez, M. (2017). *Evolución reciente de los drenajes de los ríos Chicamocha y Suarez*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- García-Chevesich, P. (2009). *Erosion processes and control*. The University of Arizona, Tucson, United States.
- Gómez, A., Berrío, J.C., Hooghiemstra, H., Becerra, M., Marchant, R. (2007). A Holocene pollen record of vegetation change and human impact from Pantano de Vargas, an intra-Andean basin of Duitama, Colombia. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 145, 143–157.
- Grupo de investigación HYDS (2021). *Modelo hidrodinámico multiescala*. Contrato de Financiamiento de Recuperación Contingente RC No. FP44842-157-20218. Producto 7. Proyecto MEGIA: Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- HydroBASINS. (2014). Hydrosheds. Recuperado de <https://www.hydrosheds.org>

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2010). Flórez, A., Barajas, A., Jaramillo, O., Barrera, M., Williams, J., Tobón, E., Martínez, N., Ceballos, J., Velandia, A., Chávez, L., Prieto, A., Ramírez, D. *Sistemas Morfogénicos del Territorio Colombiano*. Bogotá.

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2021). Catálogo Nacional de Estaciones del IDEAM. Recuperado de <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Cat-logo-Nacional-de-Estaciones-del-IDEAM/hp9r-jxuu>

IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission)*. Grupo Interno de Trabajo en Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas. Bogotá, Colombia.

Jaramillo, A., Villamizar, V., Calvo, J., Rangel, J., Parra, N. (2015). Orígenes y análisis del territorio en las ciénagas de El Congo, Musanda, Doña María, El Sordo, Juncal, Baquero, Morales y Sostilla (sur del Cesar). En Rangel, J (ed.), *Colombia, diversidad biótica XIII: complejo cenagoso Zapatosa y ciénagas del Sur del Cesar. Biodiversidad, conservación y manejo*. (19 – 54). Bogotá: Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.

Jaramillo, A., Villamizar, V., Calvo, J., Rangel, J., Parra, N. (2015). Los sedimentos de las ciénagas de El Congo, Musanda, Doña María, El Sordo, Juncal, Baquero, Morales y Sostilla (sur del Cesar). En Rangel, J (ed.), *Colombia, diversidad biótica XIII: complejo cenagoso Zapatosa y ciénagas del Sur del Cesar. Biodiversidad, conservación y manejo*. (55 - 84). Bogotá: Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.

Kleinhaus, M.G., De Hass, T., Lavooi, E., Makaske, B. (2012). Evaluating competing hypotheses for the origin and dynamics of river anastomosis. *Earth Surface Processes and Landforms*. 36 p.

Latrubesse, E.M. (2003). The late Quaternary paleohydrology of large South-American fluvial systems. In Gregory, K.J and Benito, G. (ed.), *Palaeohydrology: Understanding Global Change*. (193 – 215). New York: Wiley.

Latrubesse, E.M. (2008). Patterns of anabranching channels: The ultimate end-member adjustment of mega rivers. *Geomorphology*, 101, 130–145.

LEH-UN – Laboratorio de Ensayos Hidráulicos Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá (2005). Río Magdalena geomorfología y dinámica fluvial. Sector Betania – La Gloria.

López, C.E. (2021). Landscapes variability and the early peopling of the inter-Andean Magdalena Valley, Colombia (South America). *Quaternary International*, 578, 139-154.

Makaske, B. (2001). Anastomosing rivers: A review of their classification, origin, and sedimentary products. *Earth-Science Reviews*, 53, 149 – 196.

Makaske, B., Lavooi, E., De Haas, T., Kleinhaus, M., Smith, D. (2017). Upstream control of river anastomosis by sediment overloading, upper Columbia River, British Columbia, Canada. *Sedimentology*, 64, 1488–1510.

- Makaske, B., Smith, D., Berendsen, H., Boer, A., van Nielen-Kiezebrink, M., Locking, T. (2009). Hydraulic and sedimentary processes causing anastomosing morphology of the upper Columbia River, British Columbia, Canada. *Geomorphology*, 111, 194–205.
- Mora, G., Martínez, J. I. (2005). Sedimentary metal ratios in the Colombia Basin as indicators for water balance change in northern South America during the past 400,000 years. *Paleoceanography*, 20, 1 – 12.
- Morales, L. G. Podesta, D. J., Hatfield, W. C., Tanner, H., Jones, S. H., Barker, M. H., O'donoghue, D. J., Moler, C. E., Dubois, E. P., Ja- Cobs, C., And Goss, C. R. (1958), General geology & oil occurrences of the Middle Magdalena Valley, Colombia: Habitat of Oil. *Symposium, American Association of Petroleum Geologists*. 641-695.
- Moreno, C.J., Horton, B.K., Caballero, V., Mora, A., Parra, M. & Sierra J. (2011). Depositional and provenance record of the Paleogene transition from foreland to hinterland basin evolution during Andean orogenesis, northern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 32, 246-263.
- Morón-Polanco, S. E. (2016). *Understanding the origin and controls on the development of anabranching rivers*. The University of Adelaide, Adelaide, Australia.
- Nanson, G. C., Knighton, A. D. (1996). Anabranching rivers: their cause, character and classification, *Earth Surface processes and landforms*, 21, 217-239.
- Nardini, A., Yopez, S., Zuniga, L., Gualtieri, C., Bejarano, M. D. (2020). A Computer Aided Approach for River Styles—Inspired Characterization of Large Basins: The Magdalena River (Colombia). *Water*, 12 (1147), 29 p.
- NASA (2021). The tropical rainfall measuring mission (TRMM). Recuperado de <https://gpm.nasa.gov/missions/trmm>
- Nie, J. Horton, B. K., Saylor, J.E., Mora, A., Mange, M. Garzio- Ne, C. N., Basu, A., Moreno, C. J., Caballero, V. & Parra, M. (2012). Integrated provenance analysis of a convergent retroarc foreland system heavy minerals, Nd isotopes, and sandstone compositions of the Middle Valley basin, northern Andes, Colombia. *Earth Science Reviews*, 11, 111-126.
- NOAA (2021). Cold & Warm Episodes by season. Recuperado de https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- Ochoa, T. (2011). *Hidráulica de ríos y procesos morfológicos*. Bogotá: Ecoe ediciones.
- Pye, K., Rhodes, E.G. (1985). Holocene development of an episodic transgressive dune barrier, Ramsay Bay, North Queensland, Australia. *Marine Geology*, 64. 189—202.
- Rodríguez, A. (1985). Las cuencas intramontanas Andinas. *II Simposio Bolivariano*. Bogotá.

Romero, F., Donado, L. D., Sarmiento, G. (2018). *Plan Operativo del Proyecto MEGIA – Modelo multiescala de gestión integral del agua con análisis de incertidumbre de la información para la realización de la Evaluación Ambiental Estratégica (EAE) del subsector de hidrocarburos en el Valle Medio del Magdalena*. En Proyecto de Investigación – Contrato RC No. FP44842-157-2018.

Sarmiento, G., Puentes, J., Sierra, C. (2015). Evolución Geológica y Estratigrafía del Sector Norte del Valle Medio del Magdalena. *Geología Norandina*, 12, 51-82.

Sarmiento, G., Bonilla, G., Atuesta, D., Bermúdez, J., García, D., Hernández, S., López, L., Valdivieso, G. (2022). *Litogeoquímica del área de estudio en el Valle Medio del Magdalena. Producto 4 Proyecto MEGIA* [Manuscrito no publicado]. Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Sarmiento, G., Villamizar, V., Meneses, L., Torres, V. (2023). *Geodinámica fluvial área de estudio en el Valle Medio del Magdalena. Producto 3 Proyecto MEGIA* [Manuscrito no publicado]. Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Schumm, S. (1977). *The fluvial system*. New York:Wiley.

SGC – Servicio Geológico Colombiano. Gómez, J., Montes, N.E., compiladores. (2020). Mapa Geológico de Colombia en Relieve 2020. Escala 1:1 000 000. Servicio Geológico Colombiano, 2 hojas. Bogotá.

Sinha, R., Latrubesse, E., Nanson, G. (2012). Quaternary fluvial systems of tropics: Major issues and status of research. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, (356-357), 1-15.

Slingerland, R., Smith, N. (2004). River avulsions and their deposits. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 32, 257-285.

Smith, D., Putman, P. (1980). Anastomosed river deposits: modern and ancient examples in Alberta, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 17. 1396-1406.

Smith, D.G. (1986). Anastomosing river deposits, sedimentation rates and basin subsidence, Magdalena River, northwestern Colombia, South America. *Sedimentary Geology*, 46, 177-196.

Solomina, N., Bradley, R., Hodgson, D., Ivy-Ochs, S., Jomelli, V., Mackintosh, A., Nesje, A., Owen, L., Wanner, H., Wiles, G., Young, N. (2015). Holocene glacier fluctuations. *Quaternary Science Reviews*. 111, 9-34.

Strahler, A. (1957). Quantitative análisis of watershed geomorphology. *Transactions, American Geophysical Union*, 38 (6), 913-920.

Tanner, W. (1974). The Incomplete Flood Plain. *Geology*, 2. 105-108.

Thissen, J.J.M. (2019). *Automating surface water detection for rivers the estimation of the geometry of rivers based on optical earth observation sensors*. University of Twente, Enschede, Netherlands.

USGS - United States Geological Survey. (2019). The Natural Water Cycle. Recuperado de

<https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/el-ciclo-natural-del-agua-natural-water-cycle-spanish#8>

Valbuena, D. L. (2017). *Geomorfología y condiciones hidráulicas del sistema fluvial del río Sinú integración multiescalar 1945 – 1999 – 2016*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Thorez, J. (1976): *Practical Identification of Clay Minerals*. Institute of Mineralogy, Liège state University, Belgium.

Tucker, M.E. (2001). *Sedimentary Petrology* (3 ed.). Oxford: Blackwell Science.

USDA – United States Department of Agriculture (2020). Stream Power (and River Sensitivity Coarse Screening). Recuperado de https://extension.umass.edu/riversmart/sites/extension.umass.edu.riversmart/files/factsheets/pdf/Task_Force_StreamPower.pdf

Van der Hammen, T., Hooghiemstra, H. (2003). Interglacial–glacial Fuquene-3 pollen record from Colombia: an Eemian to Holocene climate record. *Global and Planetary Change*, 36, 181 – 199.

Van der Hammen, T. (1986). Fluctuaciones Holocénicas del nivel de inundaciones en la cuenca del bajo Magdalena-Cauca-San Jorge (Colombia). *Geología Norandina*, 10, 12-18.

Vélez, M.I., Hooghiemstra, H., Metcalfe, S., Wille, M., Berrío, J.C. (2006). Late Glacial and Holocene environmental and climatic changes from a limnological transect through Colombia, northern South America. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234, 81 – 96.

Villa-Navarro, F., Zúñiga-Upegui, P., Castro-Roa, D., García-Melo, J., García-Melo, L., Herrada-Yara, M. (2006). Peces del alto Magdalena, cuenca del río Magdalena, Colombia. *Biota Colombiana*, 7 (1), 3 – 22.

Wang, S., Chen, Z., Smith, D. (2005). Anastomosing river system along the subsiding middle Yangtze River basin, southern China. *Catena*, 60, 147 – 163.

Whipple, K.X., DiBiase, R.A., Crosby, B.T. (2013). Bedrock rivers. *Geomorphology*, 9, 550-573.

Xu, Hanqiu. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (14).