

**Descripción morfogenética y caracterización morfométrica de los abanicos aluviales entre
Tame y Hato Corozal: Contribución a la evolución geomorfológica.**

Karen Lorena Bello Quintero, María Fernanda Gómez Santos

Trabajo de grado para optar el título de Geólogas

Director

Joaquín Andrés Valencia Ortiz

Geólogo, Ms. C Geología Ambiental

Codirector

Jorge Leonardo Camargo Daza

Geólogo, Ms. C Geofísica

Universidad Industrial de Santander

Facultad Ingenierías Físico Químicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2018

DEDICATORIA

*En primer lugar a Dios mi pilar y fortaleza más grande,
A mis padres Lorena Quintero y Octavio Bello por su amor, comprensión y apoyo incondicional,
este logro es de los tres, porque sin ustedes no sería posible.*

*A mi hermanita Aleja por brindarme tanto cariño y por ser siempre motivación para mí, a mi
hermano John por sus enseñanzas y por ser un modelo a seguir, a mis hermanas por todo el
tiempo compartido.*

*A mis amigos incondicionales Lud y Silvi por caminar conmigo a través de todos los obstáculos y
ser voz de aliento, a Mafe R por enseñarme a amar la Geología tanto como ella.*

*A mis amigas de Geología por todos los momentos de aprendizaje que vivimos juntas, por su
apoyo y orientación constante.*

*A Cata y a Vane por siempre reconocer mis logros y ser tan felices como yo, al alcanzar esta
meta.*

Muchas gracias, todos ustedes forman parte de esta felicidad y tienen un lugar en mi corazón.

Karen Lorena Bello Quintero.

DEDICATORIA

A DIOS, quien ha sido y siempre será mi fortaleza.

A mis padres, Don Beli y Doña Amanda, quienes son mi razón de ser, por sus buenos consejos y dedicación, por los valores y principios que me inculcaron desde muy niña.

A mis hermanos Andre, Jose, Juanchi, Susi, Junior, Sergio y Jaider, por ser mis compañeros de muchas aventuras.

A mis nonos, tíos, primos y demás familiares que siempre estuvieron al pendiente de esta etapa de mi vida, en especial a mi tía Yas, quien siempre ha sido como mi otra mamá.

A Maure, mi mejor amiga y mi hermana de corazón, por su apoyo incondicional, por siempre estar en los buenos y malos momentos.

A mi amor lindo, Julián, quien me enseñó que todo sacrificio tiene su recompensa, por ser mi compañero de alegrías y tristezas, y mi apoyo desde la distancia.

A las amigas que me dejó geología, Jenni, Ka, Liz, Mayte y Vivi, llevo conmigo los lindos momentos y las mil vivencias compartidas, ustedes son seres maravillosos.

Este logro no es sólo mío, es nuestro.

Mil gracias, los amo.

María Fernanda Gómez Santos.

AGRADECIMIENTOS

A nuestro director, Joaquín Andrés Valencia Ortiz por su liderazgo, apoyo, orientación, dedicación y nunca perder la Fe en este proyecto, a nuestro codirector Jorge Leonardo Camargo Daza por transmitirnos sus conocimientos y apoyo incondicional. Mil gracias por la confianza depositada desde el primer momento y el acompañamiento hasta el final de este proyecto de investigación.

Al Semillero para el Análisis de los Eventos en Movimientos en Masa, Inundación y Avenidas Torrenciales de la Escuela de Geología, UIS, por su acogida durante el desarrollo del proyecto.

Al Servicio Geológico Colombiano, en especial al Grupo de Investigación de Geoamenazas por los conocimientos aportados para el avance y desarrollo de la investigación.

A la Universidad Industrial de Santander, nuestra alma mater, por forjarnos como jóvenes emprendedores. A la Escuela de Geología y cada uno de sus docentes por los conocimientos compartidos y las bases necesarias como profesionales.

Al Geólogo, Leonardo Villamizar Cáceres, por las fotografías aéreas del área de estudio suministradas.

A nuestros calificadores Diego Gerardo Ibáñez Almeida y Giovanni Jiménez Díaz, por las recomendaciones aportadas.

Karen Lorena, María Fernanda.

Tabla de Contenido

Introducción	16
1. Objetivos.....	18
1.1. Objetivo General.....	18
1.2. Objetivos Específicos	18
2. Hipótesis de la Investigación	19
3. Justificación	20
4. Localización.....	21
5. Estado del Arte.....	23
6. Marco Geológico	25
6.1. Estratigrafía	25
6.1.1. Serie las juntas – Une (K1sju).....	25
6.1.2. Formación Caja (N1c).....	26
6.1.3. Formación La Corneta (Q1co)	26
6.1.4. Depósitos aluviales antiguos (Q1al).....	27
6.1.5. Depósitos de abanicos inferiores (Q1abi)	27
6.1.6. Depósitos de abanicos superiores (Q1abs).....	27
6.1.7. Planicies aluviales recientes (Q1pal).....	28
6.1.8. Depósitos aluviales en llanuras inundables (Q2aa).....	28
6.1.9. Depósitos aluviales recientes (Q2al).....	28
6.2. Geología Estructural	30
7. Marco Teórico.....	33
8. Metodología	41
8.1. I Etapa: Recopilación Bibliográfica	41

8.2.	II Etapa: Procesamiento del MDE	43
8.3.	III Etapa: Evaluación Morfométrica.....	44
8.3.1.	Análisis morfométrico de las cuencas de proveniencia	45
8.3.2.	Análisis morfométrico de los abanicos aluviales	53
8.4.	IV Etapa: Evaluación Morfogenética	55
8.4.1.	Ambiente fluvial y lagunar.....	56
8.4.2.	Ambiente denudacional.....	62
8.4.3.	Ambiente antrópico	68
8.5.	V Etapa: Análisis Y Evaluación Final	69
9.	Resultados	75
10.	Discusión.....	87
11.	Conclusiones	93
12.	Recomendaciones.....	92
	Bibliografía.....	97

Lista de Figuras

Fig. 1 Localización del área de estudio de los abanicos aluviales.	22
Fig. 2 Mapa Geológico de la zona de estudio.	29
Fig. 3 Ambiente tectónico y principales estructuras de la esquina Nor-Occidental de Suramérica. Adaptado de Jiménez et al., 2005.....	31
Fig. 4 Curvas hipsométricas, características del ciclo de erosión. Adaptada de Racca (2007).....	39
Fig. 5 Diagrama metodológico para el trabajo de investigación.....	42
Fig. 6 Línea del tiempo de los avances sobre el estudio de los abanicos aluviales.....	43
Fig. 7 Mapa de pendientes de la zona de estudio.	46
Fig. 8 Mapa de sombras de la zona de estudio.....	47
Fig. 9 Mapa de localización de las cuencas y abanicos.	48
Fig. 10 Curva hipsométrica cuenca CC1.....	50
Fig. 11 Curva hipsométrica cuenca CC2.....	50
Fig. 12 Curva hipsométrica cuenca CC3.....	51
Fig. 13 Curva hipsométrica cuenca CC4.....	51
Fig. 14 Curva hipsométrica cuenca CC5.....	52
Fig. 15 Curva hipsométrica cuenca CC6.....	52
Fig. 16 Porcentajes del área de los tipos de ambientes.	56
Fig. 17 Distribución de las unidades morfogenéticas presentes en el ambiente fluvial.....	57
Fig. 18 Distribución de las unidades morfogenéticas presentes en el ambiente denudacional.	63
Fig. 19 Mapa geomorfológico del AB1 (abanico aluvial coalescente antiguo).....	70
Fig. 20 Mapa geomorfológico del AB2 y AB3 (abanicos aluviales sub-recientes).....	71

Fig. 21 Mapa geomorfológico del AB4 (abanico aluvial coalescente antiguo).....	72
Fig. 22 Mapa geomorfológico del AB5 (abanico aluvial sub-reciente), AB6, AB7, AB8, AB9 (abanicos aluviales remanentes) y AB11 (abanico aluvial actual).....	73
Fig. 23 Mapa geomorfológico del AB10 (abanico aluvial remanente antiguo).....	74
Fig. 24 Episodio I de la Evolución Morfogenética.	76
Fig. 25 Episodio II de la Evolución Morfogenética.	77
Fig. 26 Episodio III de la Evolución Morfogenética.....	78
Fig. 27 Episodio IV de la Evolución Morfogenética.	80
Fig. 28 Episodio V de la Evolución Morfogenética.....	81
Fig. 29 Episodio VI de la Evolución Morfogenética.	83
Fig. 30 Episodio VII de la Evolución Morfogenética.	84
Fig. 31 Episodio VIII de la Evolución Morfogenética.....	86
Fig. 32 Mapa geomorfológico de la zona de estudio.	91
Fig. 33 Registros globales de isótopos de oxígeno y carbono en aguas profundas.....	92
Fig. 34 Registros locales de isótopos de oxígeno en espeleotemas seleccionados.	92

Lista de Tablas

Tabla 1. Clasificación de cuencas según valor de compacidad.....	36
Tabla 2. Clasificación de cuencas según el factor forma (Perez, 1979).....	37
Tabla 3. Clasificación de cuencas según el Índice de alargamiento	38
Tabla 4. Clasificación de los rangos de las pendientes.	44
Tabla 5. Parámetros morfométricos de las cuencas.	49
Tabla 6. Parámetros morfométricos de los abanicos.....	49
Tabla 7. Ambientes presentes en la zona de estudio.	56
Tabla 8. Unidades morfogenéticas del ambiente fluvial.	57
Tabla 9. Unidades morfogenéticas del ambiente denudacional.	63
Tabla 10. Unidades morfogenéticas del ambiente antrópico.	68

RESUMEN

TITULO: DESCRIPCIÓN MORFOGENÉTICA Y CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE LOS ABANICOS ALUVIALES ENTRE TAME Y HATO COROZAL: CONTRIBUCIÓN A LA EVOLUCIÓN GEOMORFOLÓGICA.*

AUTORES: KAREN LORENA BELLO QUINTERO, MARÍA FERNANDA GÓMEZ SANTOS**

PALABRAS CLAVE: Abanicos aluviales, evolución geomorfológica, morfogénesis, morfometría.

DESCRIPCIÓN:

Esta investigación se centra en contribuir y ampliar el conocimiento acerca de la evolución geomorfológica de los abanicos aluviales presentes entre los municipios de Tame y Hato Corozal, para ello, fue necesario determinar las características morfogenéticas y morfométricas de la cuenca de origen y los abanicos correspondientes, así mismo las condiciones que han afectado su propia configuración geométrica, por la actividad de factores degradacionales que generan procesos erosivos, los cuales han desgastado estos materiales. Con base en la interpretación morfogenética de los abanicos aluviales y la caracterización morfométrica tanto de las cuencas origen como de los depósitos sedimentarios, se diseñaron ocho modelos evolutivos, en donde se establece la tasa de erosión de dichos abanicos, dando como resultado un índice erosivo de $43.68 \text{ Km}^3/\text{Ma}$ y se observa el comportamiento geomorfológico del área de estudio, también se determinaron los cambios significativos a través del tiempo de los depósitos sedimentarios presentes en la zona, algunos dados por los fuertes procesos de erosión que se generan debido al levantamiento que ocasiona la actividad tectónica en el área de estudio, generando así unidades morfogenéticas del ambiente denudacional como laderas erosivas (Dle), lomeríos muy disectados (Dlmd), escarpes de erosión mayor (Deem) y lomos denudados (Dlde), otros cambios se originan debido a los procesos de erosión fluvial dados por las corrientes de los ríos San Lope, Puraré, Tocoragua, Tame, Casanare, Cravo Norte y San Ignacio que dan paso a la formación de las unidades morfogenéticas del ambiente fluvial, como abanicos aluviales de distintas clasificaciones, coalescente antiguo (Faaca), remanente antiguo (Faara), remanente (Faar), sub – reciente (Faas), actual (Faaac), también lagunas (Flg) y terrazas de erosión (Fte) entre otras.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director. Joaquín Andrés Valencia Ortiz. Codirector. Jorge Leonardo Camargo Daza.

ABSTRACT

TITLE: MORPHOGENETIC DESCRIPTION AND MORPHOMETRIC CHARACTERIZATION OF ALLUVIAL FANS BETWEEN TAME AND HATO COROZAL: CONTRIBUTION TO GEOMORPHOLOGICAL EVOLUTION.*

AUTHORS: KAREN LORENA BELLO QUINTERO, MARÍA FERNANDA GÓMEZ SANTOS**

KEYWORDS: Alluvial fans, geomorphological evolution, morphogenesis, morphometry.

DESCRIPTION:

This research is focus on contribute and expand the knowledge about the geomorphological evolution of the alluvial fans that are located between the municipalities of Tame and Hato Corozal. It was necessary determinate the morphogenetic and morphometric characteristics of the source basin and the corresponding fans. Also the conditions that has affected their own geometrical configuration were determined by the activity of degradation factors that generate erosive processes, which have eroded these materials. Based on the morphogenetic interpretation of the alluvial fans and the morphometric characterization of the source basins and the sedimentary deposits, eight models were designed, where it's established the erosion rate of the mention fans giving as a result an erosive index of 43.68 Km³/Ma and it's observed the geomorphological behavior of the study area, also significant changes of the sedimentary deposits that are located on the zone were determined through the time. Some were given by the strong erosion processes that are generated due to the lifting that causes the tectonic activity in the study area, generating morphogenetic units of the denudational environment such as erosive hillside (Dle), very dissected rolling hills (Dlmd), higher erosion escarpments (Deem) and denuded ridges (Dlde), other changes originate due to fluvial erosion processes given by the currents of the San Lope, Puraré, Tocoragua, Tame, Casanare, Cravo Norte and San Ignacio rivers that generate the formation of the morphogenetic units of the fluvial environment, such as alluvial fans of different classifications, old coalescent (Faaca), ancient remnant (Faara), remnant (Faar), sub - recent (Faas), current (Faaac), also lagoons (Flg) and erosion terraces (Fte) among others.

* Degree Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director. Joaquín Andrés Valencia Ortiz. Codirector. Jorge Leonardo Camargo Daza.

Introducción

La evolución del paisaje está condicionada a los cambios que se presenten por factores tanto internos como externos de la corteza terrestre (exógenos y endógenos), estos cambios se generan por procesos que vinculan también eventos de meteorización, erosión y transporte de los materiales (procesos degradacionales y agradacionales) (INVEMAR, 2007). A partir de estos procesos se crean condiciones específicas en el terreno, presentándose así diferentes tipos de ambientes geomorfológicos. Entre estos se describe el denudacional, eólico, cárstico, glacial, periglacial, volcánico, marino, antrópico, estructural y fluvial (SGC, 2012), siendo este último el que contiene parte significativa de las unidades morfogénicas que se estudiarán en la zona comprendida entre los municipios de Tame y Hato Corozal (Departamento de Arauca y Casanare).

Una definición más completa de las unidades morfogénicas corresponde a la descripción detallada de las unidades geomorfológicas, las cuales se clasifican según sus características en un ambiente específico, siendo así los abanicos aluviales pertenecientes al ambiente fluvial y lagunar donde se incluyen las geoformas originadas por procesos erosivos por parte de las corrientes de los ríos y posterior acumulación o sedimentación de materiales en las áreas aledañas a dichas corrientes, tanto en épocas de grandes avenidas e inundaciones, como en la dinámica normal de las corrientes perennes, durante la época seca (Carvajal, *et al.*, 2012).

El estudio de abanicos aluviales ha ido aportando diversas definiciones con el paso del tiempo, de esta manera resaltando algunos de los aspectos más significativos y esclareciendo algunas ambigüedades con respecto a ellos, entre esas el contenido exacto del concepto de abanicos aluviales. A grandes rasgos actualmente los abanicos aluviales son conos de detritus que se forman

en un rompimiento de pendiente en el borde de una llanura aluvial, se forman por deposición de un flujo de agua y sedimentos provenientes de la erosión adyacente a la cuenca (Nichols, 2009). Entre las características más relevantes del cuerpo del abanico se encuentra: zona proximal, media, distal, como también de coalescencia con otros abanicos, es decir posibilidad de unión entre ellos, también presentan características específicas como lo son: ápice, base, punto de intersección y avulsión (Gómez Villar, 1996). Así mismo es importante resaltar aquellos elementos que controlan el desarrollo y la modificación de los abanicos aluviales, ya que su configuración actual depende directamente de estos factores. Según Gómez Villar (1996) la proporción de material suministrado que controla el desarrollo y la dinámica de los abanicos aluviales, responde a ciertos factores de tipo tectónico, topográfico, geológico, climático y de vegetación, como también aquellos que controlan el transporte de sedimentos a través del sistema del abanico: sistemas de drenaje, pendiente de los abanicos y tipo de material.

Según su clasificación climática, los abanicos aluviales se separan entre “húmedos” y “secos”, siendo estos abanicos aluviales de clima árido, formados por flujos fluviales intermitentes y abanicos aluviales de clima húmedo generados por flujos hídricos perennes (Schumm en Gutiérrez Elorza, 2008).

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Realizar la descripción morfogénica y caracterización morfométrica de los abanicos aluviales de piedemonte presentes entre los municipios de Tame y Hato Corozal, como contribución en la evolución geomorfológica de la región.

1.2. Objetivos Específicos

- Identificar y construir los componentes morfogénicos de los abanicos aluviales de piedemonte.
- Definir los elementos morfométricos de los abanicos aluviales de piedemonte.
- Realizar el análisis morfométrico de las cuencas origen, para determinar los factores genéticos de cada abanico.
- Contribuir sobre la evolución de los abanicos aluviales presentes en la zona de estudio.

2. Hipótesis de la Investigación

El entorno de investigación se centra en la descripción de las características de los abanicos aluviales en función de su evolución a partir de las condiciones morfogenéticas y morfométricas, tomando a este estudio como un aspecto donde se materializan cada definición que se ha dado en el tiempo. Es así, como un abanico aluvial se constituye por la creación de un depósito sedimentario con una expansión radial en planta, desarrollado a partir de un punto de rotura de pendiente en la base de una ladera o de un frente montañoso (Garzón Heydt, *et al.*, 2009). Su origen está relacionado a la actividad de varios factores, los cuales se encargan de proporcionar las condiciones necesarias para su creación, siendo este el resultado de una compleja interacción de factores climáticos y tectónicos, explicada por medio de las características topográficas, geológicas e hidrológicas de la cuenca, por procesos de erosión, requiriendo condiciones geológicas similares para su formación (Petts & Foster en Gómez Villar, 1996) y deposición (Morisawa en Gómez Villar, 1996).

El estudio de abanicos aluviales se ha ido expandiendo con el tiempo en varios países de Europa, Suramérica, Norteamérica y Asia, debido al interés económico que se destaca por algunas de sus características, entre ellas, los fenómenos de disipación de energía que se traducen en acumulaciones hidráulicas de minerales pesados (Vos en Colombo, 1992). Además, los cuerpos de abanicos aluviales se han construido mediante la alternancia de tramos terrígenos gruesos y finos o tramos potencialmente permeables e impermeables, por lo cual, pueden tener interés como fuente de extracción de agua “acuíferos” y en casos muy puntuales pueden servir como rocas para el almacenamiento de hidrocarburos (Colombo, 1992).

Este trabajo de investigación busca ampliar el conocimiento acerca de la evolución geomorfológica de los abanicos aluviales presentes entre los municipios de Tame y Hato Corozal, para ello, es necesario determinar las características morfogenéticas y morfométricas de la cuenca de origen y los abanicos correspondientes, así mismo las condiciones que han afectado su propia configuración geométrica, por la actividad de factores degradacionales que generan procesos erosivos, los cuales han desgastado estos materiales.

Este proyecto a realizar se enmarca en un trabajo mayor, presente como una primera fase de una descripción más regional de los abanicos de piedemonte llanero, es decir, contribuir con los aspectos morfogenéticos y morfométricos a la evolución de una región de los Llanos Orientales, creando una nueva oportunidad para seguir realizando investigación y profundización en el tema.

3. Justificación

La geología de Colombia en sus descripciones morfogenéticas para los abanicos aluviales en el Piedemonte Llanero, tiene un precedente histórico antiguo y su relación está ceñida a un parámetro de gran escala. El Servicio Geológico Colombiano (SGC), anteriormente llamado INGEOMINAS, en sus planchas 138, 139, 154 y 155 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), da aportes de manera general sobre el conocimiento de los abanicos presentes en el Piedemonte, en estos trabajos no se evidencia una correlación espacio-área ni orden de eventos que dieron origen a la formación de dichos abanicos. Como un propósito de este proyecto de investigación, es busca contribuir y ampliar el conocimiento acerca de la evolución morfogenética de los abanicos

aluviales presentes entre los municipios de Tame y Hato Corozal, mediante el análisis de los diferentes componentes morfogenéticos, morfométricos y factores externos que afectan el sistema de abanicos.

4. Localización

El área de estudio se encuentra localizada en el flanco Este de la Cordillera Oriental de Colombia, en la región de los Llanos Orientales, entre los municipios de Tame y Hato Corozal (Fig. 1). El sector Occidental presenta una topografía escarpada de colinas alargadas y valles en V, con alturas que varían entre 3.200 y 2.000 m.s.n.m. El sector central muestra una topografía de colinas suaves, con alturas que varían entre 1.500 y 1.000 m.s.n.m. y en el sector oriental su topografía corresponde a regiones planas suaves, donde las alturas varían entre 600 y 400 m.s.n.m (GSG, 2015).

La región de los Llanos Orientales es de carácter monomodal, esto significa que tiene solamente un máximo bien definido en el año, por lo cual presenta una época de lluvias de abril a noviembre y una época seca de diciembre a abril, coincidiendo con la presencia y ausencia de la Zona de Convergencia Intertropical (franja de bajas presiones ubicada en la zona ecuatorial donde confluyen los vientos alisios del sureste y del noreste), debido a la baja presencia de accidentes topográficos, el movimiento de la ZCIT es también responsable de la aparición de lluvias en la región. Además, la humedad se fortalece con la cercanía a la Cordillera donde se generan procesos

de formación de lluvias orográficas (producidas por el ascenso de una columna de aire húmedo al encontrarse con una elevación del terreno) (Guzmán *et al.*, 2014).

Cabe resaltar las características climáticas del área de estudio, entre ellas: precipitación total anual de 3.000 a 3.500 mm de agua, con un intervalo de 150 a 200 días con lluvia, temperatura media anual cálida (mayor a 24°C) y una clasificación climática cálida húmeda, estas variables permiten caracterizar el comportamiento espacio-temporal de la climatología en forma más detallada para esta zona (IDEAM, 2005).

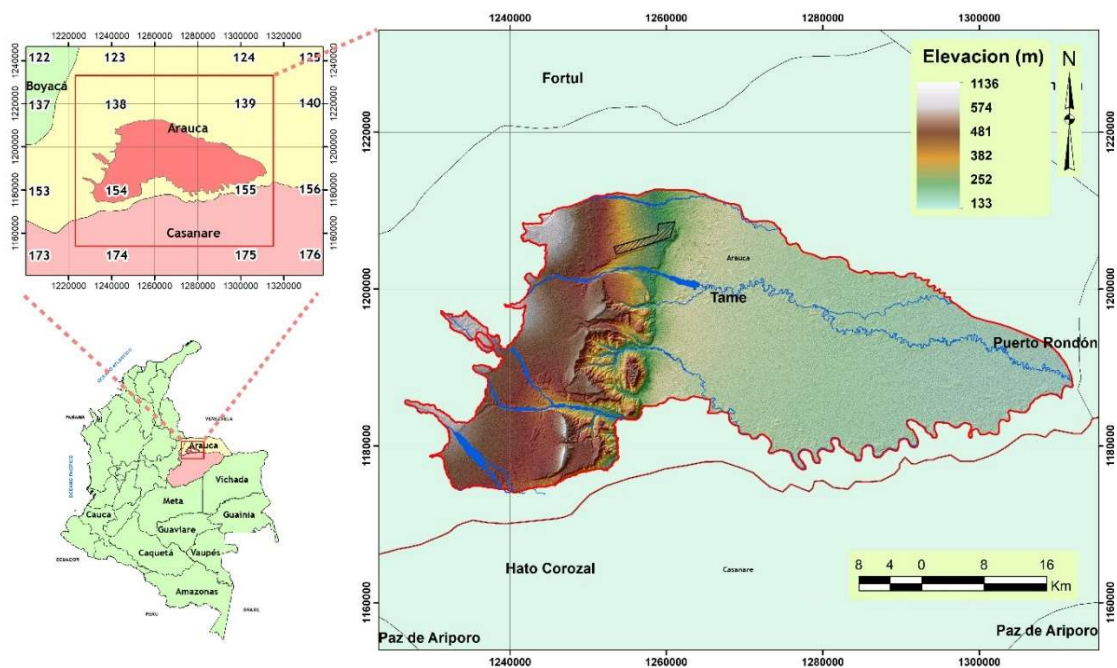


Fig. 1 Localización del área de estudio de los abanicos aluviales.

5. Estado del Arte

Los abanicos aluviales han sido objeto de estudios geológicos por parte de investigadores desde el siglo pasado hasta la actualidad. A continuación, se realiza una síntesis desde una perspectiva global acerca de los trabajos enfocados al análisis y evolución de dichos abanicos.

Aunque en estudios realizados entre 1779 - 1796 ya se hablaba acerca de este tipo de depósitos, sólo en 1873 Drew, F., en su trabajo *Alluvial and lacustrine deposits and glacial records of the Upper Indus Basin*, aplicó por primera vez el término “alluvial fan”, que en español traduce abanico aluvial. Estos trabajos estaban enfocados en establecer el origen de los abanicos aluviales, según trabajos citados por Gómez Villar (1996), a mediados del Siglo XIX, el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), junto a investigadores reconocidos como Gilbert, Miller, Geikie y McGee entre otros, estudiaron los depósitos de abanicos aluviales en Nueva Zelanda con el fin de ampliar el conocimiento del origen de estos depósitos (Gómez Villar, 1996).

El Siglo XX inicia con estudios relevantes hacia el entendimiento de las características genéticas de los abanicos aluviales, en estos se destacan Davis y sus seguidores Baker, Bryan, Pack y Johnson. Estudios sobre la génesis y procesos secundarios que generan la remodelación de la superficie de los abanicos fueron realizados por Bomey, Rickmers, Pack, entre otros, así mismo, el análisis de los ambientes áridos y su relación con los abanicos aluviales fue desarrollado por Pack y Blackwelder, todos estos conceptos descritos en el trabajo realizado por Gómez Villar (1996).

A partir de 1960, la investigación de los abanicos aluviales inicia una etapa crucial de avance y desarrollo, la ramificación de los estudios en este campo, permitió fortalecer el conocimiento acerca de estos depósitos, entre las ramas más destacadas se encuentra los trabajos

relacionados con la características generales de los abanicos aluviales, de los cuales se reconoce a Bull *et al.*, (1964) quienes describen los abanicos aluviales como accidentes geográficos agradacionales que comúnmente se forman a lo largo de discontinuidades topográficas, así mismo, interpretan los procesos que intervienen en la desarrollo de los abanicos aluviales como flujos catastróficos provenientes del confinamiento de los cañones y depositados en un patrón semicónico en las zonas más planas de los valles (Cartwright & Burr, 2017). Determinar la morfología de los abanicos y su relación con el área fuente de sedimentos correspondió a un punto importante para el avance en el conocimiento de estos depósitos, trabajos realizados por Anderson & Hussey, Beaty, Hack, Bull, Hooke, entre otros, lograron clasificar los abanicos aluviales en un régimen climático imperante de la zona de depositación, siendo estos catalogados en cuatro tipos: Abanicos aluviales de clima áridos, semiáridos, templados y húmedos (Gómez Villar, 1996). Estudios acerca de los diferentes procesos depositacionales y características sedimentológicas, junto a la relación entre parámetros morfométricos y desarrollo de los abanicos fueron descritos por diferentes autores como Nilsen, Ori, Hooke, Krainer, Blaie & McPherson, entre otros.

Actualmente, el análisis de los abanicos aluviales ha tenido un interés científico característico, varios estudios se han enfocado en los parámetros morfométricos, morfológicos, como también de su distribución y formación de estos, los cuales son procesados mediante programas en base a Sistemas de Información Geográficas (SIG), como ArcGIS, QGIS e ILWIS, con el fin de identificar abanicos aluviales en otros cuerpos planetarios (Birch *et al.*, 2016; Cartwright & Burr, 2017). Por otra parte, identificar los procesos neotectónicos que han afectado la configuración original de los abanicos también ha sido objeto de estudio para los investigadores, entre ellos se encuentran (Sancho *et al.*, 2008).

En Colombia, el estudio de los abanicos aluviales ha tenido un menor a casi nulo desarrollo, entre estos se encuentra Vargas *et al.*, (2008) el cual estudia las condiciones y características del Abanico del Quindío. Sobre los abanicos aluviales del Piedemonte Llanero se hallan los trabajos desarrollados por el SGC, tales como los mapas geológicos escala 1:100.000, planchas 138, 139, 154 y 155 y sus respectivas memorias explicativas (SGC, 2014).

6. Marco Geológico

6.1. Estratigrafía

El área de estudio acorde a las memorias explicativas de las planchas 138 y 154 escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano presenta una geología predominantemente sedimentaria. La geología de esta zona data desde el Cretácico Inferior hasta el Cuaternario – Holoceno, está compuesta por 9 unidades geológicas que se describen a continuación de la más antigua a la más reciente (SGC, 2014).

6.1.1. Serie las juntas – Une (K1sju). En el área de estudio se presenta esta unidad en la parte superior de los ápices de algunos abanicos hacia el sector oeste del mapa (Fig. 2). Está conformada por bancos de areniscas cuarzosas de grano grueso a conglomerados, en bancos de 0,50 m a 20 m de espesor, con estratificación cruzada a plano paralela. Los conglomerados

presentan intraclastos de lodolitas. En diferentes sectores aparecen ocasionalmente estratos de areniscas con niveles centimétricos de limolitas grises. Ulloa & Rodríguez (1976), mencionan que esta unidad fue depositada en un ambiente marino, posiblemente deltaico. Para esta serie, se propone la edad entre el Valanginiano (Fabre, 1981).

6.1.2. Formación Caja (N1c). Se encuentra en su mayoría limitada por la Falla Paz de Ariporo y la Falla del Borde Llanero en el área de estudio (Fig. 2). La Formación Caja se divide en dos segmentos:

- Segmento A: Está compuesto por arcillolitas y lodolitas de color amarillento a rojizo, con intercalaciones de arenitas de cuarzo de 2 a 4 m de espesor, con lentejones de conglomerados. El espesor aproximado de este segmento es de 300 m.
- Segmento B: Se compone de una alternancia de areniscas gris amarillenta, de grano fino a conglomeráticas, en estratos gruesos a muy gruesos, con intercalaciones de limolitas, lodolitas, limolitas arenosas, limolitas conglomeráticas con guijos, cantos, fragmentos de arenitas y cherts. El espesor aproximado es de 650 m.

Según Ulloa & Rodríguez (1976), la Formación Caja en su parte inferior es marina, con influencia de zonas de oleaje, mientras que en la parte superior es pantanosa a fluvial. Montoya *et al.*, (2013), suponen que la base de la Formación Caja puede abarcar parte del Mioceno Tardío.

6.1.3. Formación La Corneta (Q1co). En el área de estudio esta unidad está principalmente limitada por la Formación Caja y por las Planicies aluviales recientes (Fig. 2). Está compuesta por conglomerados de guijos hasta bloques de areniscas de granos variables en una

matriz arcillosa. Los guijos y bloques son subesféricos, subelongados a redondeados. El espesor de esta unidad puede ser mayor en el área a los 250 m aproximadamente. Su origen puede tener relación con los depósitos de llanuras aluviales y su edad puede considerarse como Pleistoceno y corresponder a la última fase de la Orogenia Andina (Ulloa & Rodríguez, 1976).

6.1.4. Depósitos aluviales antiguos (Q1al). Los depósitos aluviales antiguos se encuentran contiguas a los depósitos aluviales recientes y están cortando a la Formación Caja (Fig. 2). Se componen de gravas, con bloques, cantos, guijos, de areniscas embebidos en una matriz areno arcillosa. El espesor de estos depósitos varía entre 30 m y 50 m aproximadamente.

6.1.5. Depósitos de abanicos inferiores (Q1abi). Estos depósitos están ubicados únicamente al noroeste del área de estudio junto al Anticlinal Corozal (Fig. 2). Los depósitos de abanicos están relacionados con las descargas intempestivas y en forma de avalanchas del río Tame. Presentan una pendiente de 1° , estando limitados al occidente por la Falla Paz de Ariporo y al oriente por la Falla del Borde Llanero. En general están conformados por bloques, gravas, arenas de formas variadas en una matriz por lo general areno-limosa. Los clastos corresponden principalmente a cuarzoarenitas y conglomerados.

6.1.6. Depósitos de abanicos superiores (Q1abs). Se localizan hacia la zona oeste del área de estudio asociados a la dinámica del río Tame, junto al Sinclinal de Zamaricote (Fig. 2). Morfológicamente presentan una pendiente aproximada de 3° . Su composición es similar a los

depósitos de abanicos inferiores, aunque con un contenido más elevado de bloques, guijos y guijarros de rocas cuarzosas, indicando que la fuente está próxima.

6.1.7. Planicies aluviales recientes (Q1pal). Morfológicamente corresponden a zonas planas a semiplanas y se encuentran cortados por los depósitos aluviales recientes (Fig. 2). Están conformados por materiales no litificados de bloques, cantos y guijos de arenitas embebidos por una matriz limoarcillosa.

6.1.8. Depósitos aluviales en llanuras inundables (Q2aa). Son depósitos que únicamente se encuentran en los Llanos, hacia el sector noreste del área de estudio (Fig. 2). Morfológicamente conforman un paisaje plano, caracterizado por la presencia de áreas inundables o bajos, que se pueden relacionar lateralmente con humedales y en menor proporción por bancos (zonas ligeramente más altas) no inundables. Comúnmente los depósitos que conforman los bancos son limo-arenosos, mientras que los que constituyen los bajos tienen composición arcillosa.

6.1.9. Depósitos aluviales recientes (Q2al). Se encuentran principalmente en las márgenes de los principales ríos San Lope, Puraré Casanare, Tocoragua, San Ignacio, Tame y de las quebradas Cano Puna Puna, Casirba y El Totumo, que se presentan en la región de estudio (Fig. 2). Están constituidos por gravas con tamaños bloques, cantos y guijos principalmente de areniscas, embebidos en una matriz limoarenosa.

6.2. Geología Estructural

El territorio colombiano comprende un dominio continental deformado, situado en el límite de tres placas tectónicas mayores, la placa Suramericana, la placa de Nazca y la placa Caribe. Los movimientos relativos de estas placas durante la era Cenozoica dieron origen al sistema orogénico de los Andes del Norte, compuesto por distintas cadenas de montaña separadas por valles y depresiones intramontañosas (Taboada *et al.*, 2000). El cinturón montañoso de los Andes en Colombia está conformado por tres cordilleras: Occidental, Central y Oriental, esta última, corresponde a un cinturón orogénico intracontinental con una orientación N-NE, con una extensión de 750 km, presentando alturas de entre los 3000 metros y 5000 metros contrastando con la baja topografía del Escudo Guayanés (Taboada *et al.*, 2000), la zona de estudio se encuentra localizada en el flanco Este de la Cordillera Oriental, en el Piedemonte Llanero, definido estructuralmente por Linares *et al.*, (2003), como una zona mayoritaria de pliegues y fallas de “escama delgada” de rumbo Suroeste – Noreste con vergencia SE (Fig. 3) (Jimenez *et al.*, 2005).

La zona de estudio corresponde al área comprendida entre los municipios de Tame y Hato Corozal, ésta se caracteriza por su complejidad donde se presentan tres estilos tectónicos, partiendo desde el occidente con un estilo compresivo donde hace presencia la Falla Guaicáramo, dejando en evidencia una serie de monoclinales.

El segundo, está contenido entre la Falla de Guaicáramo y la Falla del Borde Llanero, generando grandes plegamientos, sistemas anticlinales – sinclinales y fallamiento inverso de la Falla Paz de Aripuro. El ultimo se presenta hacia la zona oriental, se encuentra limitado por la Falla

del Borde Llanero y comprende la Región de los Llanos orientales, caracterizada por su topografía plana (SGC, 2014).

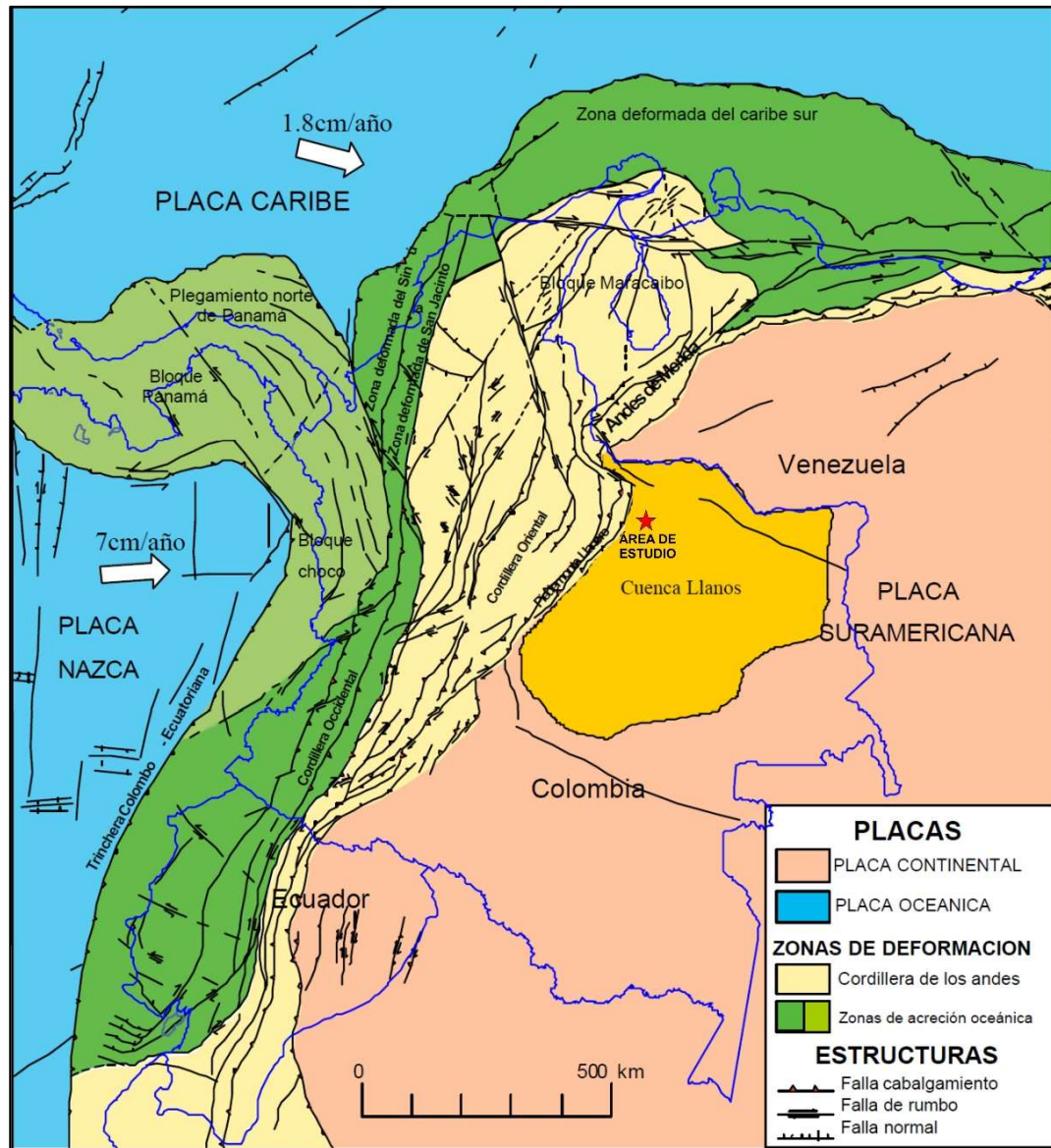


Fig. 3 Ambiente tectónico y principales estructuras de la esquina Nor-Occidental de Suramérica. Adaptado de Jiménez et al., 2005.

La Falla de Guaicáramo corresponde a una falla inversa de tipo dextral, esta estructura se extiende por más de 185 km, en dirección general N35°E, a través del piedemonte de la Cordillera

Oriental, poniendo en contacto rocas del cretáceo cabalgando rocas del Neógeno y depósitos cuaternarios, ubicadas en el frente montañoso y en la cuenca de los Llanos Orientales respectivamente. Fue catalogada por el SGC, como una falla activa con una actividad moderada (Montes & Sandoval , 2001).

La Falla del Borde Llanero corresponde a una falla inversa con buzamiento Noroeste, pertenece al sistema frontal de la Cordillera Oriental, Paris & Sarria, (1988), la consideran como la falla más activa del sistema. Los rasgos morfotectónicos asociados a la traza de la falla estan caracterizados por deformaciones y basculamientos de los depósitos cuaternarios aluviales, entre las Poblaciones de Hato Corozal y Tame. Reyes & Cardozo, (2000), la denominan como Sistema de Fallas del Borde Llanero, constituida por varias fallas subparalelas con una extensión de centenares de kilómetros en dirección NE-SW y posiblemente al norte se une con la Falla de Boconó, a través del sistema de Chucarima – Chitagá (Montes & Sandoval , 2001).

La Falla Paz de Ariporo presenta una dirección general N5°E, inclinada hacia el noroeste, subparalela a la Falla del Borde Llanero, corresponde a una falla inversa que afecta las secuencias de la Formación Caja en la zona al occidente de la Falla del Borde Llanero (SGC, 2014).

Entre los municipios de Tame y Hato Corozal, se han evidenciado efectos neotectónicos compresionales con fallamiento y plegamiento, entre ellos el sinclinal de Zamaricote, Anticlinal Corozal, la Falla Guaicáramo y la Falla del Borde Llanero (GSG, 2014).

7. Marco Teórico

La geomorfología es la ciencia que estudia las formas de la superficie terrestre enfocada a describir, entender su génesis y su actual comportamiento, las unidades geomorfológicas que conforman la superficie del terreno son la finalidad del estudio de la geomorfología. (Universidad Autónoma del Estado de México, 2014). Esta disciplina está dividida en ramas de estudio, como lo son, la morfogénesis, la morfometría y la morfodinámica. El factor morfogenético determina las causas y procesos que modelaron el relieve, condiciones como, los factores endógenos y exógenos y el grado de actividad, (agradacional o degradacional).

La interpretación morfogenética se realiza a través de diferentes insumos, entre estos se tienen en cuenta las imágenes satelitales (Google Earth y Landsat) y el Modelo Digital de Elevación (MDE), así mismo es necesaria la implementación de documentos como la Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia, el Glosario de unidades y subunidades geomorfológicas del Servicio Geológico Colombiano, el Manual de Geopedología, y los libros “*Alluvial Fans: Geomorphology, sedimentology, dynamics*” y “*Sedimentology and stratigraphy*”.

Una imagen satelital o imagen de satélite se puede definir como la representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial. Estos sensores recogen la información reflejada por la superficie de la Tierra que luego es enviada de regreso a ésta y es procesada convenientemente (Rodriguez & Arredondo, 2005).

El Modelo Digital de Elevación (MDE) es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo, este modelo funciona como base para la generación de los mapas de pendientes y sombras a través de los cuales se empieza a realizar la caracterización del terreno (Mena *et al.*, 2011).

La información presente en documentos como la Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia, la cual hace énfasis en la caracterización de las unidades geomorfológicas (UG), y en su homogeneidad espacial la cual se fundamenta en criterios genéticos, morfológicos, geométricos y procesos morfodinámicos cartografiables y no cartografiables aplicados (Carvajal *et al.*, 2012). También el contenido del Glosario de unidades y subunidades geomorfológicas del Servicio Geológico Colombiano, sobre el cual se realizará la interpretación geomorfológica del área de estudio, ya que este glosario presenta definiciones de cada unidad dependiendo del ambiente al que pertenezca, haciendo más sencilla la tarea de localizar determinadas unidades debido a sus características morfogenéticas y morfométricas (SGC, 2012). El Manual de Geopedología propone un enfoque paisajístico integrando geoforma y suelo, el cual puede resultar ventajosamente complementario con el enfoque digital y contribuir a mejorar la base conceptual de este último (Zinck, 2012). Además el libro “*Alluvial Fans: Geomorphology, sedimentology, dynamics*” es una recopilación de artículos hecha por la Sociedad Geológica de Londres, la cual busca hacer énfasis en temas de geomorfología, sedimentología y dinámica, permitiendo así la posibilidad de ampliar información con respecto a los estudios geomorfológicos (Harvey *et al.*, 2005). Finalmente, el libro “*Sedimentology and stratigraphy*” está destinado a proporcionar una introducción a la sedimentología y estratigrafía, así como a los conceptos y terminología utilizada en trabajos más avanzados (Nichols, 2009).

La morfometría es la rama de la geomorfología que se encarga de la descripción y análisis cuantitativo de las características del relieve, tales como su tamaño y forma. Esta evaluación se realiza tanto para las cuencas de proveniencia como también para sus abanicos aluviales. El análisis morfométrico de una cuenca corresponde al estudio de un conjunto de variables lineales, de superficie y relieve, las cuales permiten conocer las características físicas de ésta, dichos parámetros se dividen en dos grupos, parámetros generales y parámetros de forma (Cardona, 2008). Los parámetros morfométricos para las cuencas evaluadas toman en cuenta el área de la cuenca (A_c), volumen de la cuenca (V_c), perímetro (P), altura promedio de la cuenca (H_{pc}), pendiente de la cuenca (P_c), longitud (L_c), ancho (A_{cu}), coeficiente de compacidad (C_c), factor forma (F_f), índice de alargamiento (I_a), índice de Melton (IM) y la curva hipsométrica (Bull, 1964; Junco, 2004; Bahrami, 2013; Birch *et al.*, 2016; W. Méndez, 2016).

Entre los parámetros morfométricos generales se encuentra el área de la cuenca (A_c), ésta corresponde al tamaño de la superficie de cada cuenca en Km^2 , su valor se obtiene automáticamente a partir de la digitalización y poligonización de las cuencas en un SIG (QGIS v.3.0.1), la delimitación de una cuenca hidrográfica se realiza a través de una línea imaginaria, denominada divisora de agua o “*divortium aquarium*”, en latín, que separa las pendientes opuestas de las cumbres (Junco, 2004), así mismo, la longitud de la línea divisoria de aguas hace referencia al perímetro de la cuenca (P), este parámetro es importante al momento de comparar cuencas de igual área, ya que a partir de ello se puede definir la forma de la cuenca (Junco, 2004). Al igual que el área y el perímetro, las alturas promedio de las cuencas (H_{pc}) son determinadas a partir del MDE de cada cuenca, y corresponde a la elevación promedia referida al nivel base de la boca de cada cuenca (Jardí, 1985). Para Cardona (2008), la pendiente media de la cuenca (P_c) corresponde al valor medio del declive del terreno y la inclinación, respecto a la horizontal, de la vertiente sobre

la cual se ubica la cuenca, así mismo, define la longitud máxima de la cuenca (L_c) como la distancia horizontal desde la desembocadura de la cuenca (punto de desfogue) hasta otro punto aguas arriba donde la tendencia general del río principal corte la línea de contorno de la cuenca.

Los parámetros de forma, como su nombre lo indica, buscan comparar la forma de la cuenca con figuras geométricas conocidas, ésto mediante la cuantificación de las características morfológicas por medio de índices o coeficientes, entre estos se encuentran el coeficiente de compacidad (C_c), el cual se define como la razón entre el perímetro de la cuenca (P) y el perímetro de la circunferencia. Este índice, propuesto por Gravelius, compara la forma de la cuenca con la de una circunferencia, cuyo círculo inscrito tiene la misma área de la cuenca en estudio (A_c) (Eq. 1) (Junco, 2004).

$$C_c = 0.28 \times \frac{P}{\sqrt{A_c}} \quad (1)$$

Este coeficiente define la forma de la cuenca, respecto a la similaridad con formas redondas, independiente del área estudiada tiene por definición un valor de 1 para cuencas imaginarias de forma exactamente circular. Se definieron tres categorías para la calificación de las cuencas según este parámetro (Tabla 1) (Junco, 2004).

Tabla 1.
Clasificación de cuencas según valor de compacidad.

RANGOS DE C_c	FORMA DE LA CUENCA
1 – 1.25	Redonda a oval redonda
1.25 – 1.5	Oval redonda a oval oblonga
1.5 – 1.75	Oval oblonga a rectangular oblonga

El factor forma (F_f), corresponde a otra variable que evalúa la elongación de una cuenca de drenaje. Fue descrita por Magette en 1976, quien la denominó *Form factor* (Jardí, 1985), aunque

otros autores han trabajado para esclarecer este parámetro, Horton lo expresa como la relación existente entre el área de la cuenca (A_c), y el cuadrado de la longitud máxima (L_c) o longitud axial de la misma (Eq. 2) (Junco, 2004).

$$Ff = \frac{A_c}{L_c^2} \quad (2)$$

Siguiendo con el valor establecido, si la forma de la cuenca es aproximadamente circular, entonces el valor de Ff se acercará a uno, mientras que, las cuencas más alargadas, tendrán un Ff menor, en este tipo de cuencas las descargas son de menor volumen debido a que el cauce de agua principal es más largo que los cauces secundarios y los tiempos de concentración para eventos de precipitación son distintos. Pérez (1979), clasifica las cuencas según el factor forma (Tabla 2).

Tabla 2.
Clasificación de cuencas según el factor forma (Perez, 1979).

RANGO DEL Ff	FORMA DE LA CUENCA
< 0.22	Muy alargada
0.22 – 0.30	Alargada
0.30 – 0.37	Ligeramente alargada
0.37 – 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 – 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 – 0.80	Ensanchada
0.80 – 1.20	Muy ensanchada
>1.20	Rodando el desagüe

El índice de alargamiento (I_a), propuesto por Horton, relaciona la longitud máxima de la cuenca (L_c) con su ancho máximo (A_{cu}) medido perpendicularmente a la dimensión anterior (Eq. 3), cuando los valores del I_a son mayores a la unidad, se trata de cuencas alargadas, mientras que para valores cercanos a 1, corresponde a una cuenca cuya red de drenaje presenta la forma de abanico (patrón de drenaje dicotómico) y puede tenerse un río principal corto.

$$Ia = \frac{Lc}{Acu} \quad (3)$$

Existen tres categorías para la clasificación de las cuencas según este parámetro (Tabla 3) (Junco, 2004).

Tabla 3.
Clasificación de cuencas según el Índice de alargamiento.

RANGOS DE Ia	FORMA DE LA CUENCA
< 1.4	Poco alargada
1.5 – 2.8	Moderadamente alargada
2.9 – 4.2	Muy alargada

Otro parámetro esencial en el análisis morfométrico corresponde al Índice de rugosidad de Melton (IM), éste hace referencia a la relación entre la diferencia del punto más alto de la cuenca (Hmax) y el más bajo (Hmin), con la raíz cuadrada del área de la cuenca (Ac) (Eq. 4). Este índice es empleado para diferenciar cuencas basandose en la dinámica de sus sedimentos, es decir, cuencas capaces de producir flujos de detritos y cuencas en las que sólo se presentan crecidas sin sedimentos (Junco, 2004).

$$IM = \frac{(Hmax-Hmin)}{\sqrt{Ac}} \quad (4)$$

Wilford *et al.*, (2004), demostró que la combinación de la longitud de la cuenca con este índice, permite diferenciar entre cuencas susceptibles a originar flujos de detritos, de otras cuencas susceptibles a generar crecidas con detritos. Sus resultados señalan que con un índice de Melton hasta 0.3 y una longitud de cuenca > 2.7 Km, se presentan crecidas con detritos, mientras que con un índice de Melton mayor a 0.6 y una longitud de cuenca < 2.7 Km, es más probable que ocurran flujos de detritos (Campués, 2007). El último parámetro de forma evaluado representa la curva hipsométrica, la cual es empleada para determinar la distribución del área en la cuenca desde la

parte superior hasta la parte más baja, se obtiene ubicando en las ordenadas los valores correspondientes a las diferentes alturas de la cuenca referidos a la máxima de la misma y, en las abscisas, los valores de área que se encuentran por encima de las alturas correspondientes, referidas al área total de la cuenca. De esta forma se utilizan valores relativos (porcentuales), lo que hace posible comparar curvas de diferentes cuencas, prescindiendo de las dimensiones absolutas (Fig. 4) (Racca, 2007). A partir del análisis hipsométrico, se puede determinar el ciclo erosivo y la etapa evolutiva en que se encuentra la cuenca (Cardona, 2008).

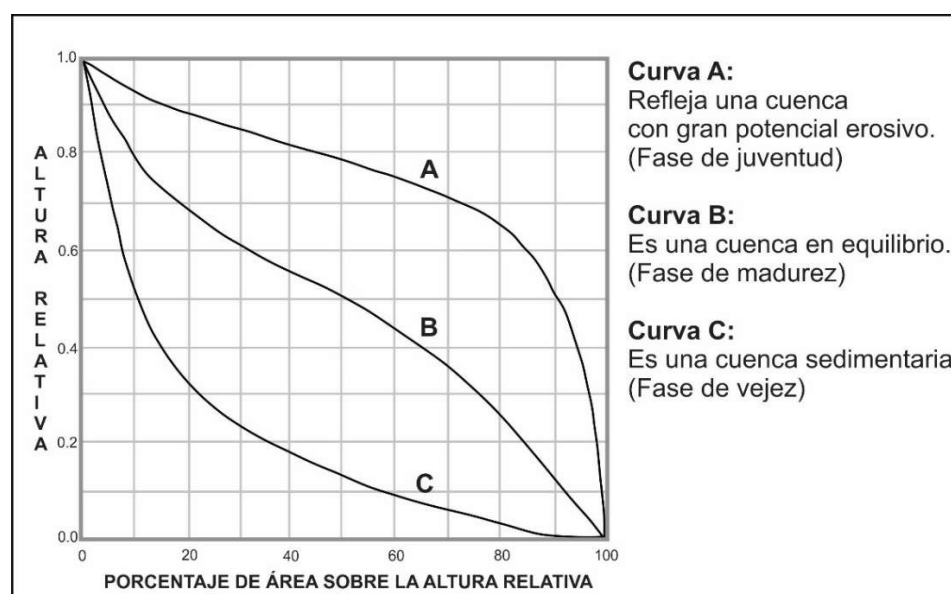


Fig. 4 Curvas hipsométricas, características del ciclo de erosión. Adaptada de Racca (2007).

En el caso de los abanicos aluviales, los parámetros morfométricos evaluados corresponden al área del abanico (A_a), volumen del abanico (V_a), pendiente del abanico (P_a), altitud promedio (H_{pa}), longitud del abanico (L_a), ancho del abanico (A_{ab}) atrincheramiento (E), altitud máxima (H_{max}) y altitud mínima (H_{min}) (Bull, 1964; Junco, 2004; Bahrami, 2013; Birch *et al.*, 2016; W. Méndez, 2016).

Colombo (1992), en su trabajo hace énfasis en la estrecha relación entre el área del abanico (Ab) y la cuenca de drenaje, donde indica que el área ocupada por un abanico es directamente proporcional al área de su cuenca, de igual manera Gómez Villar (1996), argumenta que estas áreas están influenciadas por diversos factores, entre los cuales se encuentra la cuenca de proveniencia, el clima y la litología. En el análisis morfométrico de los abanicos, la pendiente del abanico (Pa) corresponde a un parámetro de gran importancia, ésta es medida desde el ápice del abanico hasta la zona más distal, donde el abanico se fusiona con otro abanico coalescente o con los depósitos del río en la depresión del valle (Bull, 1964). La pendiente de los abanicos aluviales disminuye gradualmente desde el frente montañoso hasta la zona más distal del abanico, algunos autores hacen referencia a ello, como Blissenbach (1954), quien en su artículo expone “desde el ápice del abanico la superficie se sumerge hacia la base en esa dirección, los ángulos de inclinación se vuelven gradualmente más planos”, para el SGC, el valor promedio de la pendiente de un abanico aluvial varía entre 3° y 5° .

El valor de las pendientes de cada abanico se determinó mediante el procesamiento del MDE, así mismo, el valor de la altura promedio (Hpa) y los valores a , b y c , empleados para el parámetro de atrincheramiento (E), éste último, corresponde al encajonamiento en el abanico de un canal que en el punto de intersección aporta sedimentos a su superficie (Gómez Villar, 1996). El atrincheramiento máximo para cada abanico es calculado como la diferencia de elevación entre el lecho del canal (c) y la elevación máxima de la superficie del abanico a los lados derecho (b) e izquierdo del canal (a) (Eq. 5) (Bahrami, 2013).

$$E = \frac{(a-c)+(b-c)}{2} \quad (5)$$

8. Metodología

Con el fin de contribuir en el conocimiento de la evolución morfogenética de los abanicos aluviales del Piedemonte Llanero, mediante el análisis de los componentes morfogenéticos, parámetros morfométricos y comportamiento tectónico de la región, se genera el mapa de unidades morfogenéticas a escala 1:25.000. Este estudio de investigación se desarrolla en cinco etapas, de las cuales se obtuvieron las características morfométricas tanto de las cuencas como de los abanicos, así mismo la generación e interpretación del mapa de unidades geomorfológicas y la reconstrucción de la evolución del sistema de abanicos en el piedemonte (Fig. 5).

8.1. I Etapa: Recopilación Bibliográfica

Se desarrolla a partir de la búsqueda y adquisición de información que permitió obtener los conocimientos básicos sobre los componentes geomorfológicos de los abanicos aluviales, tales como la morfogénesis y la morfometría, así mismo se obtuvo información acerca de los parámetros morfométricos para las cuencas de drenajes y su influencia sobre los depósitos aluviales estudiados.

Dicha información se tomó de artículos y trabajos de grado adquiridos mediante la base de datos de la Universidad Industrial de Santander así como de sus convenios con revistas científicas internacionales online, estos estudios realizados por Blissenbach (1954), Bull *et al.*, (1964), Colombo (1992), Gómez Villar (1996), Campués (2007), Gutierrez (2008), Sancho *et al.*, (2008), Vargas (2008), Garzón (2009), Nichols (2009), SGC (2012; 2014), GSC (2015), Birch *et al.*, (2016), Mendez (2016) y Cartwright *et al.*, (2017), se encuentran en la Fig. 6.

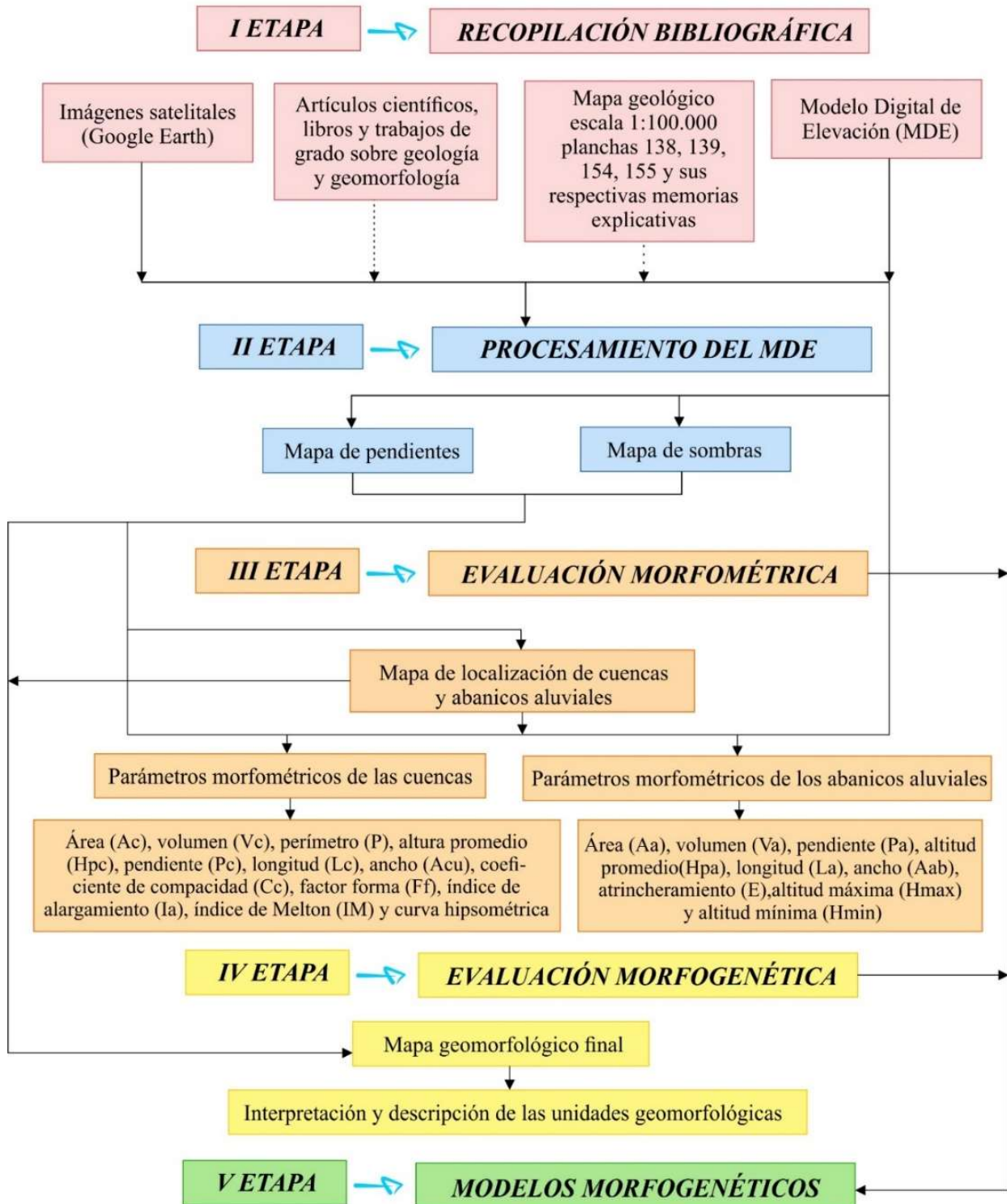


Fig. 5 Diagrama metodológico para el trabajo de investigación.

La información correspondiente a mapas geológicos escala 1:100.000 del área de estudio y sus respectivas memorias explicativas fueron extraídas de la base de datos del Servicio Geológico Colombiano. El modelo digital de elevación cuenta con una resolución de 12.5 m, fue realizado por la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) (ASF, 2017).

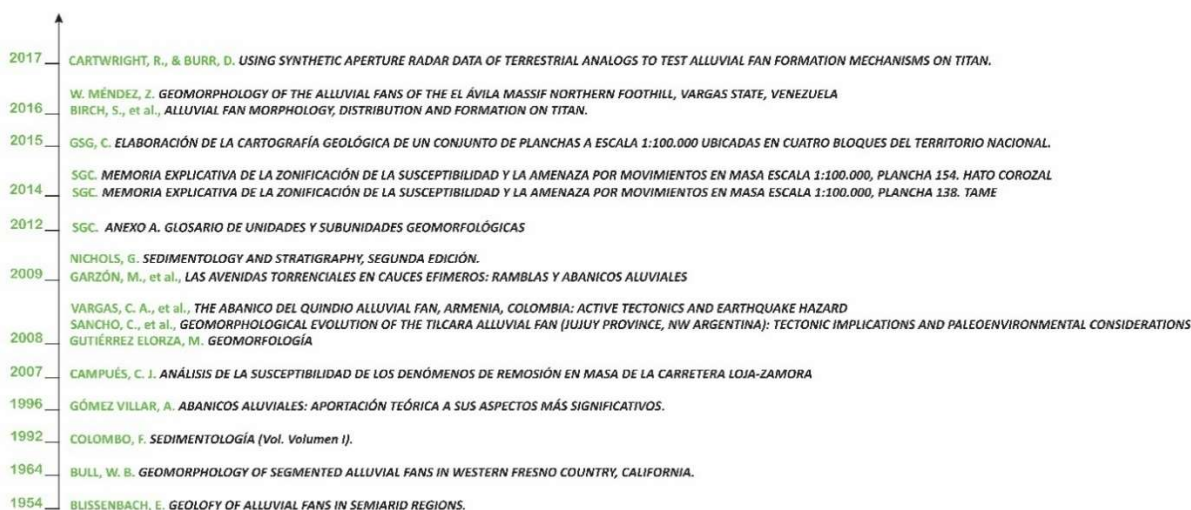


Fig. 6 Línea del tiempo de los avances sobre el estudio de los abanicos aluviales.

8.2. II Etapa: Procesamiento del MDE

El procesamiento del MDE se realizó mediante el Software QGIS v. 3.0.1, a partir de ello se obtuvo el mapa de pendientes (Fig. 7), este mapa se reclasifica bajo los valores que aparecen en la Tabla 4, el mapa de sombras que también se obtuvo del MDE (Fig. 8) y el mapa de localización de cuencas y sus respectivos abanicos (Fig. 9). Los cálculos morfométricos tales como: área, perímetro, volumen, alturas máximas y mínimas, pendiente promedio, ancho y longitud tanto de las cuencas como de los abanicos, (Tabla 5) y (Tabla 6) respectivamente, fueron obtenidos mediante la herramienta presente en el programa QGIS. Para la interpretación geomorfológica se utiliza el mapa de pendientes (Fig. 7) como el mapa de sombras (Fig. 8), con los cuales se obtiene un relieve con la diferenciación de colores referentes a la altura que representan, luego se generan

los polígonos pertinentes a las geoformas que constituyen cada clasificación de unidades geomorfológicas.

Tabla 4.
Clasificación de los rangos de las pendientes.

COLOR / PENDIENTE	RANGOS
1	0 – 7
2	7 – 11
3	11 – 19
4	19 – 40
5	> 40

8.3. III Etapa: Evaluación Morfométrica

En este capítulo se describen las características morfométricas de las cuencas, tales como dimensiones, volumen, forma y etapa evolutiva, así mismo, para los abanicos aluviales, donde se exponen sus características volumétricas, de área, pendientes promedio y cuencas de proveniencia. Mediante la interpretación de las medidas morfométricas de las cuencas y los abanicos, derivadas de MDE, se obtuvo los parámetros morfométricos para las cuencas, donde se describe la cuenca de proveniencia 1 (CC1), cuenca de proveniencia 2 (CC2), cuenca de proveniencia 3 (CC3), cuenca de proveniencia 4 (CC4) y cuenca de proveniencia 5 (CC5) (Tabla 5).

Los abanicos descritos, como abanico aluvial coalescente antiguo (AB1), abanico aluvial sub-reciente (AB2), abanico aluvial sub-reciente (AB3), abanico aluvial coalescente antiguo (AB4), abanico aluvial sub-reciente (AB5), abanico aluvial remanente (AB6), abanico aluvial remanente (AB7), abanico aluvial remanente (AB8), abanico aluvial remanente (AB9), abanico aluvial remanente antiguo (AB10) y abanico aluvial actual (AB11) (Tabla 6), éstos se procesaron mediante un SIG (QGIS). En la Fig. 9 se encuentran localizadas las cuencas y los abanicos aluviales estudiados.

8.3.1. Análisis morfométrico de las cuencas de proveniencia. El análisis morfométrico de las cuencas se realiza con el objetivo de cuantificar las características físicas de éstas, para así poder darles una clasificación según su tamaño y forma, así mismo determinar su etapa de desarrollo.

La cuenca C_1 se encuentra localizada hacia el extremo Suroeste fuera de la zona de trabajo, presenta un área de 391 Km^2 y un volumen de 957 Km^3 , el análisis de sus parámetros morfométricos indican que ésta corresponde a una cuenca alargada a moderadamente alargada, la cual se encuentra en una etapa madura (Fig. 10).

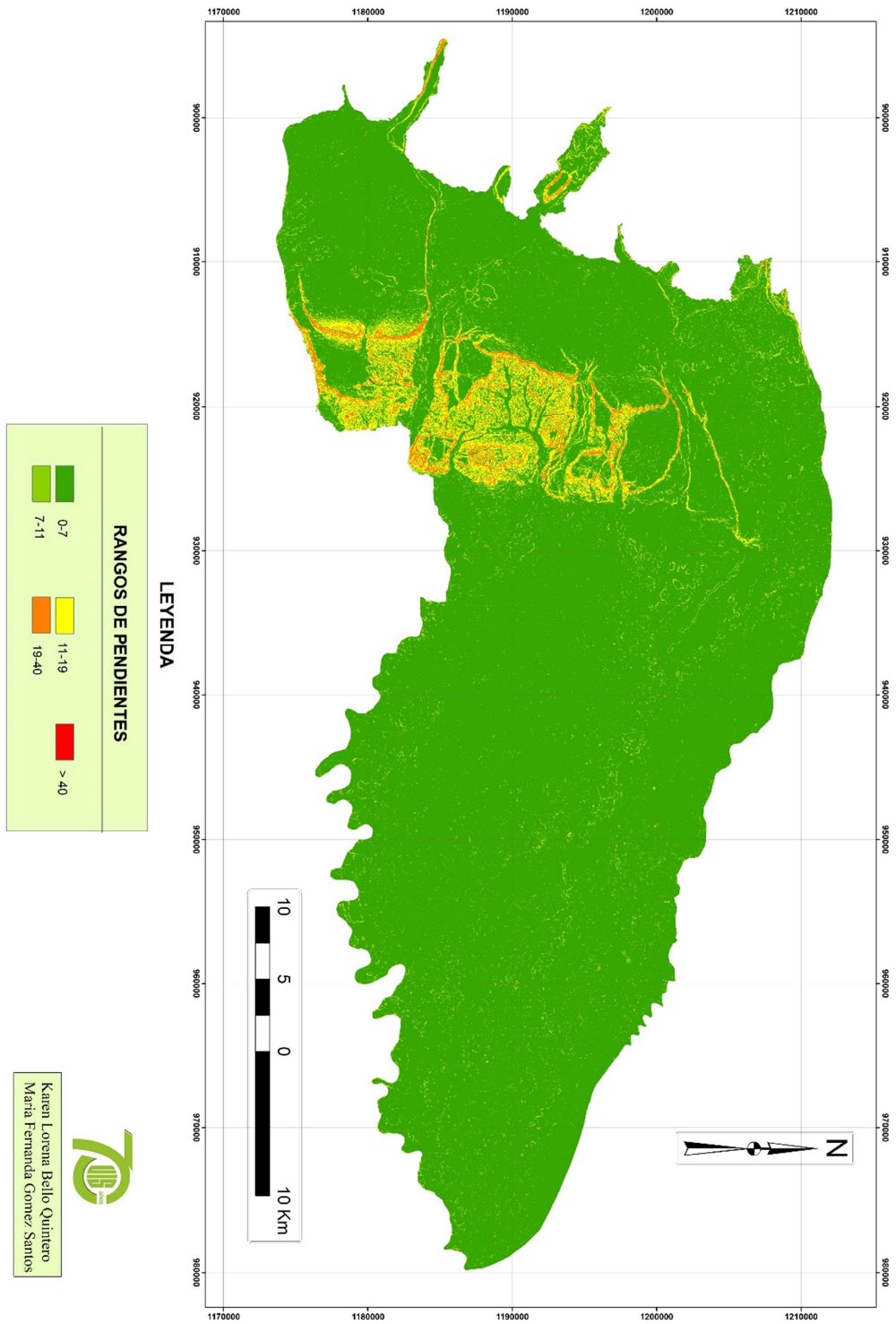


Fig. 7 Mapa de pendientes de la zona de estudio.

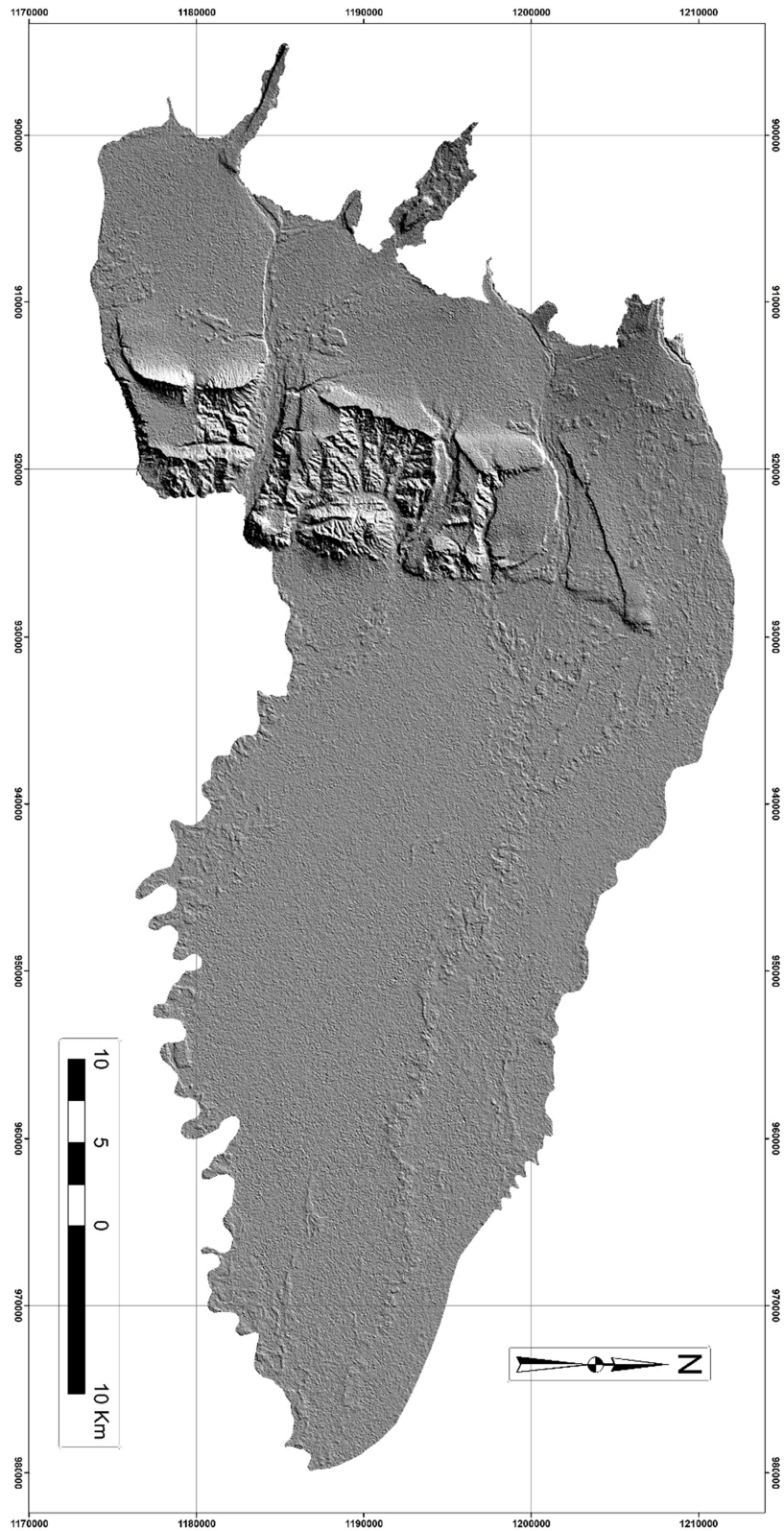


Fig. 8 Mapa de sombras de la zona de estudio.

Karen Lorena Bello Quintero
María Fernanda Gómez Santos



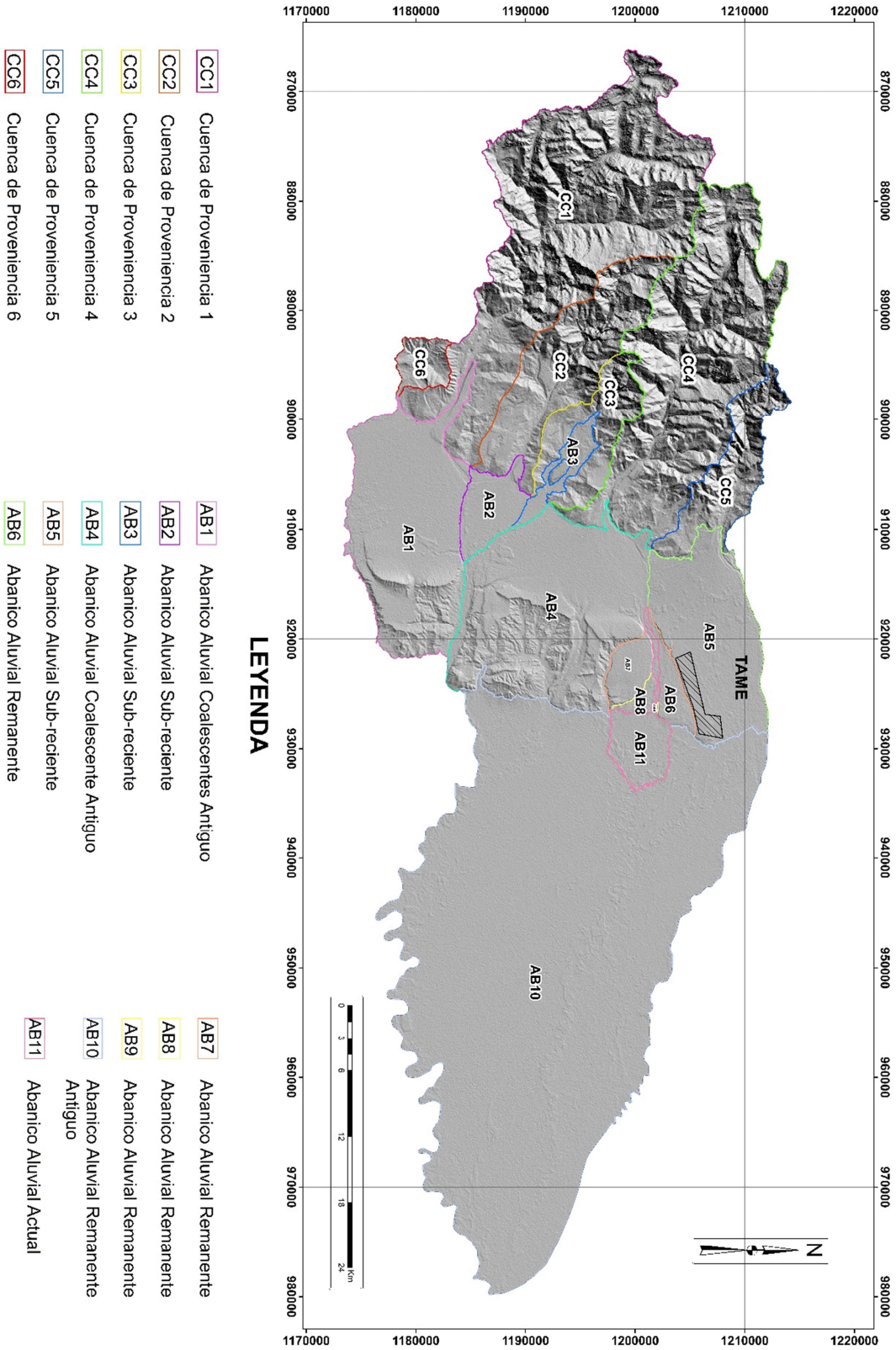


Fig. 9 Mapa de localización de las cuencas y abanicos.

Tabla 5.
Parámetros morfométricos de las cuencas.

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LAS CUENCAS													
CUENCA	Área (km ²)	Volumen (km ³)	Perímetro (km)	Ancho máx (m)	Longitud (m)	Altura máx (msnm)	Altura mín (msnm)	Altura promedio (msnm)	Pendiente promedio de la cuenca (°)	Coefficiente de compacidad	Factor forma	Índice de Alargamiento	Índice de Melton
CC1	391.3	957.7	145.9	20,521.1	40,508.6	5138	519	4619	27.66	2.08	0.24	1.97	0.23
CC2	131.8	292.1	73.6	5,802.6	25,815.9	3983	508	3475	48.86	1.81	0.19	4.45	0.3
CC3	60.3	111.3	70.1	4,408.1	15,773.3	3143	526	2617	20.77	2.54	0.24	3.58	0.35
CC4	298.3	645.9	120.8	11,843.4	32,634.1	4638	544	4094	28.24	1.97	0.28	2.76	0.23
CC5	69.1	131.0	65.0	4,782.9	18,479.9	3624	547	3077	26.38	2.21	0.20	3.86	0.37
CC6	20.0	8.1	21.5	5,094.2	6,862.2	1419	604	815	17.28	1.36	0.42	1.35	0.18

Tabla 6.
Parámetros morfométricos de los abanicos.

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LOS ABANICOS													
CUENCA DE PROVENIENCIA	ABANICO	Área (km ²)	Volumen (km ³)	Ancho (m)	Longitud (m)	Ancho/ longitud	Pendiente promedio del abanico (°)	Atrincheramiento (m)	Altura máx (msnm)	Altura mín (msnm)	Altura promedio del abanico (msnm)		
CC1 y CC6	AB1	204.41	98.01	10,357.55	28,258.70	0.37	5.50	11.50	968	273	620.5		
	AB2	35.26	6.73	5,436.61	10,993.25	0.49	3.36	3.50	678	382	530.0		
	AB3	18.61	7.40	1,716.80	13,169.16	0.13	4.85	6.00	1,136	462	799.0		
	AB4	252.77	69.34	17,000.55	19,004.35	0.89	7.15	21.00	741	239	490.0		
	AB5	140.23	76.29	9,288.83	19,825.09	0.47	4.01	21.50	1,021	238	629.5		
	AB6	17.62	2.08	3,938.29	10,983.21	0.36	3.87	-	452	241	346.5		
	AB7	20.51	1.41	3,233.02	8,106.99	0.40	5.35	-	462	248	355.0		
	AB8	6.01	0.29	2,710.48	4,038.34	0.67	4.45	-	350	258	304.0		
	AB9	0.34	0.01	442.05	1,022.37	0.43	5.01	-	307	271	289.0		
	AB10	1,052.12	173.40	23,122.59	53,884.20	0.43	3.20	-	344	133	238.5		
	AB11	35.87	7.49	5,225.40	16,948.40	0.31	3.19	13.50	451	193	322.0		

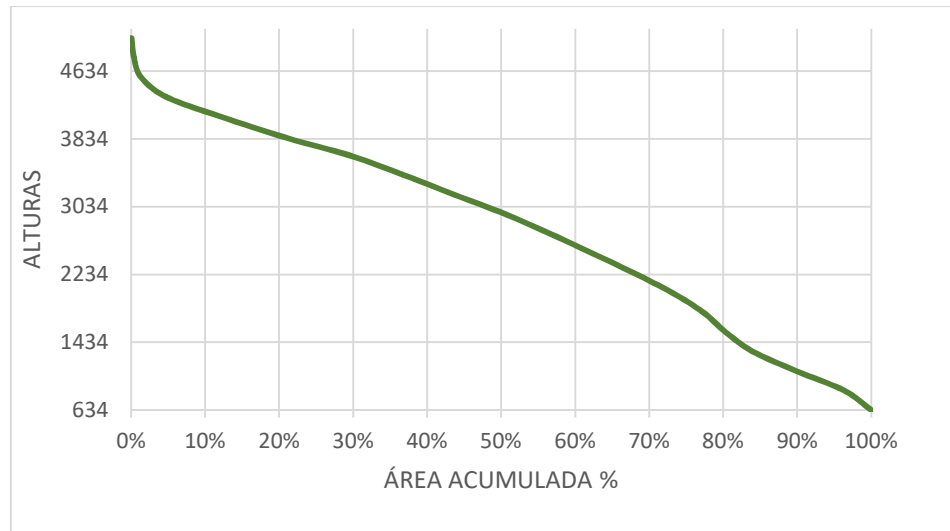


Fig. 10 Curva hipsométrica cuenca CC1.

La cuenca C_2 corresponde a una cuenca muy alargada, presenta un área aproximada de 132 Km^2 y un volumen de 292 Km^3 , actualmente se encuentra en una etapa de equilibrio, es decir, en etapa madura (Fig. 11).

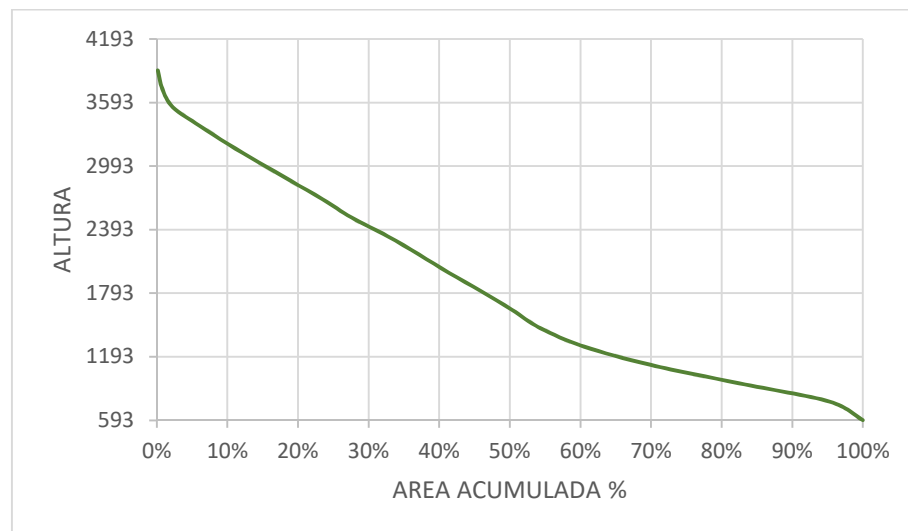


Fig. 11 Curva hipsométrica cuenca CC2.

La cuenca C_3 , al igual que la cuenca C_1 , presenta una forma alargada a muy alargada, aunque ésta cubre sólo un área de 60 Km^2 y un volumen de 111 Km^3 , se encuentra en una etapa madura según su curva hipsométrica (Fig. 12).

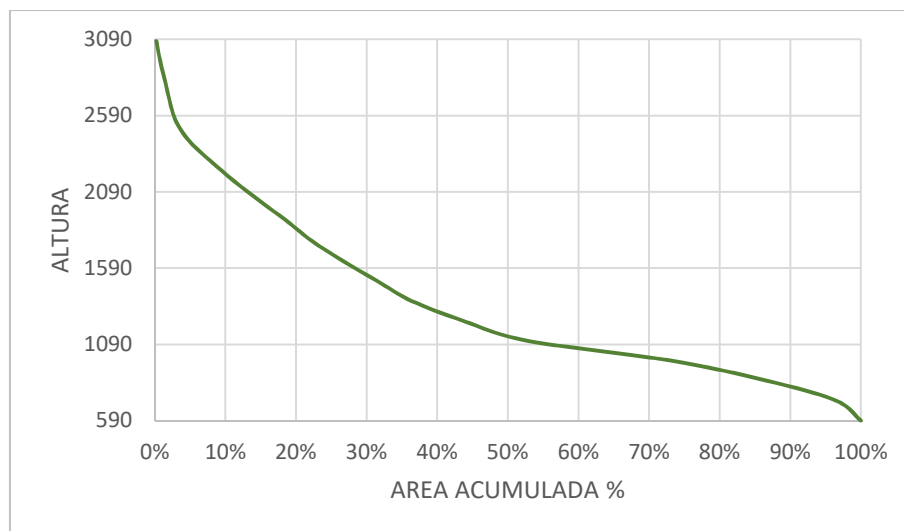


Fig. 12 Curva hipsométrica cuenca CC3.

La cuenca C₄, corresponde a una de las cuencas de proveniencia más grandes de la zona estudiada, con un área cercana a los 300 Km² y un volumen que ronda los 646 Km³, esta cuenca aporta materiales a diferentes abanicos tales como el AB₄, AB_{6R}, AB_{7R}, AB_{8R}, AB_{9R} y finalmente el AB₁₁, su configuración actual corresponde a una cuenca alargada a muy alargada en etapa madura (Fig. 13).

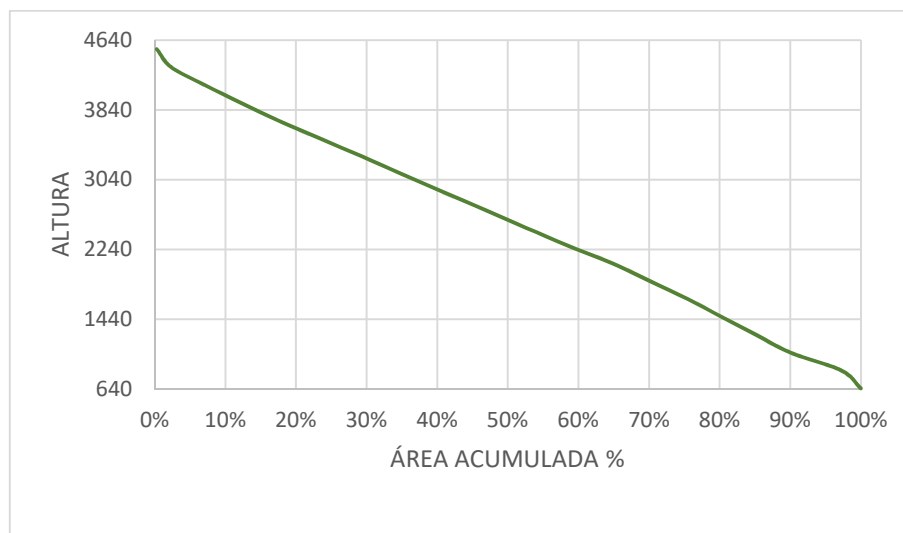


Fig. 13 Curva hipsométrica cuenca CC4.

La cuenca C₅ se encuentra localizada en el extremo noroccidental fuera de la zona de trabajo, cuenta con un área de 69 Km² y un volumen de 131 Km³, corresponde a una cuenca en etapa madura (Fig. 14), con una forma alargada a muy alargada.

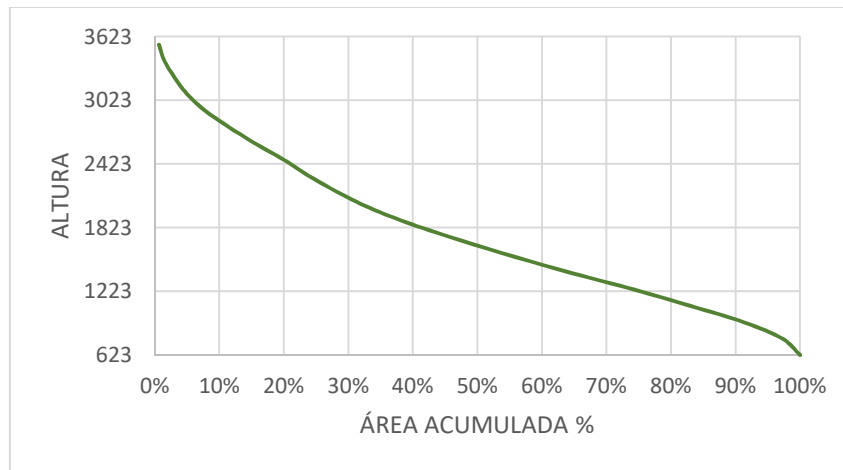


Fig. 14 Curva hipsométrica cuenca CC5.

La cuenca C₆ corresponde a la cuenca más pequeña entre las evaluadas, presenta un área de tan solo 20 Km² y un volumen de 8 Km³, a diferencia de las demás cuencas, ésta presenta una forma redonda, este resultado fue determinado tras el análisis de los parámetros morfométricos de forma, así mismo, el análisis de la curva hipsométrica indica que se encuentra en una etapa evolutiva madura (Fig. 15).

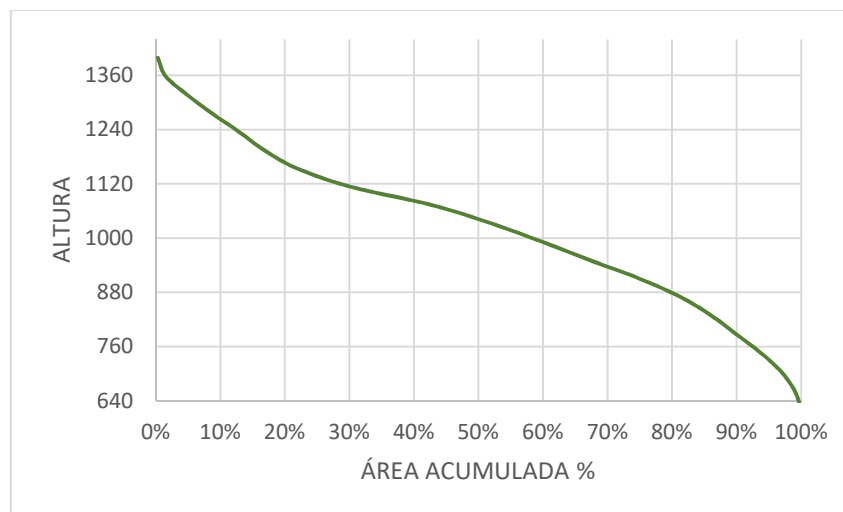


Fig. 15 Curva hipsométrica cuenca CC6.

El análisis de las curvas hipsométricas, realizada para cada cuenca, muestra de manera general una tendencia a una fase madura, indicando así que estas cuencas se encuentran en equilibrio, es decir, donde su potencial erosivo tanto lateral como a profundidad es proporcional. Así mismo, la evaluación de los parámetros de forma, indican que, en su mayoría, las cuencas presentan una forma alargada a muy alargada, esto hace referencia a la dinámica del agua en los drenajes y su potencial erosivo, donde en este tipo de cuencas, las descargas son de menor volumen.

8.3.2. Análisis morfométrico de los abanicos aluviales. El análisis morfométrico de los abanicos se realiza con el fin de determinar mediante diferentes parámetros el ciclo evolutivo de estos depósitos, llegando a obtener las tasas de erosión a través del tiempo desde la configuración inicial del depósito hasta la actualidad

El abanico AB1, se encuentra localizado en el extremo Sur del área de trabajo, limitado por el Río Casanare hacia el sur y el Río Puraré hacia el norte, cubriendo un área de 204 Km² y un volumen aproximado de 98 Km³, así mismo presenta una pendiente promedio de 5.5°, este abanico recibe aportes de material provenientes de las cuencas C1 y C6. Este abanico presenta un fuerte basculamiento en su cuerpo debido al levantamiento por efecto de la Falla Paz de Ariporo y del Sistema de Fallas del Borde Lanero.

El abanico AB2, cubre un área 35 Km² y un volumen de aproximadamente 7 Km³, presenta una pendiente promedio de 3.3° y su área fuente corresponde a la cuenca C2. Se encuentra limitado en su zona sur por el Río Puraré y hacia el norte por el Río Tocoragua. Este abanico en su configuración actual no ha sufrido mayor afectación por el Sistemas de Fallas del Borde Llanero y la Falla Paz de Ariporo.

El abanico AB3, corresponde a un pequeño depósito de forma cónica con un área de 18 Km² y un volumen de aproximadamente 7,5 Km³, presenta una pendiente promedio de 4.9° y su área fuente corresponde a la cuenca CC3, está limitado por los abanicos AB2 y AB4, en su parte central se encuentra un alto topográfico correspondiente a una terraza erosiva, dicha geoforma se omitió al momento de realizar los cálculos morfométricos, debido que su génesis es de un desarrollo no coetáneo al abanico.

El AB4, corresponde al abanico con mayor extensión, presenta un área de 253 Km² y un volumen que se aproxima a 70 Km³, tiene una pendiente media de 7.1° y su área fuente corresponde a la cuenca CC4. Éste abanico se encuentra localizado en la zona centro-occidental del área de trabajo, limitado por el Río Tocaragua hacia el sur y el Río Tame en el extremo norte. Al igual que el AB1, este abanico sufrió modificaciones en su configuración inicial producto de la Falla de Paz de Ariporo y del Sistema de Fallas del Borde Llanero, actualmente activas.

El abanico AB5 tiene como área fuente la cuenca C5, presenta un área de 140 Km² y un volumen aproximado de 76 Km³, su pendiente promedio corresponde a 4°. Se localiza en el extremo norte del área de trabajo, entre los Ríos Tame y Cravo Norte, actualmente sobre la zona más distal del depósito se encuentra el casco urbano del municipio de Tame. Su configuración actual permite identificar que dicho abanico no se encuentra afectado por el Sistema de Fallas del Borde Llanero y la Falla Paz de Ariporo, lo cual da indicios de que su depositación sucedió posterior a la actividad tectónica regional.

Los AB6, AB7, AB8 y AB9 corresponden a cuerpos remanentes de abanicos antiguos, se encuentran localizados a los márgenes del Río Tame. Estos abanicos en conjunto suman un área de 44 Km² y un volumen aproximado de 3.8 Km³, su área fuente provenía de la cuenca C4, esto se identificó gracias al análisis morfogenético de estos depósitos.

El AB10, es una composición de los eventos erosivos de los AB1 y AB4, sumado a esto se toman los aportes de los depósitos aluviales formados recientemente que provienen de estos mismos abanicos, los cuales son producto del fallamiento y posterior levantamiento de los depósitos antiguos que se erosionaron por agentes hidrológicos. Este conjunto de depósitos remanentes se encuentra localizado en el extremo oriental de la zona de estudio, presenta un área de 1052 Km² y un volumen de 173 Km³, limitado por los Ríos Cravo Norte y Tame hacia el norte y el Río Casanare en el sur.

El abanico AB11 corresponde al abanico más reciente en la zona de estudio, es definido como un abanico telescópico, presenta una dinámica donde sus materiales son transportados desde el área fuente, la cuenca C4, por el Río Tame hasta el punto de intersección donde se presenta un proceso de acumulación del material. Cubre un área de 35 Km² y un volumen de 7.5 Km³ aproximadamente, presenta una pendiente promedio de 3.2° característica de este tipo de depósitos aluviales.

8.4. IV Etapa: Evaluación Morfogenética

La morfogénesis es aquella rama de la geomorfología que estudia el origen y la evolución de la forma del relieve, es decir de las unidades geomorfológicas (Valencia, 2017).

El área de estudio está compuesta por diferentes unidades geomorfológicas, de tipo fluvial, denudacional y antrópico dependiendo de su origen y las características que presenten. A continuación se describen estas unidades a partir de su extensión (Tabla 7), porcentaje (Fig. 16), características morfogenéticas y morfométricas. En el área de estudio predomina el ambiente

fluvial que es en su gran mayoría abanicos aluviales de diferentes clasificaciones. En menor proporción se encuentra el ambiente denudacional y antrópico.

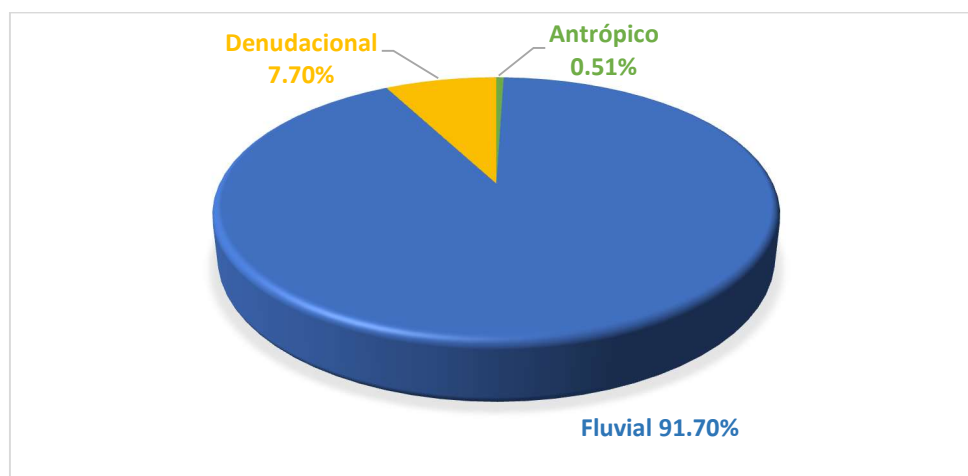


Fig. 16 Porcentajes del área de los tipos de ambientes.

Tabla 7.

Ambientes presentes en la zona de estudio.

AMBIENTE	ÁREA [Km ²]	PORCENTAJE DEL ÁREA TOTAL (%)
Fluvial	1639.60	91.7
Denudacional	137.39	7.7
Antropogénico	9.25	0.51

8.4.1. Ambiente fluvial y lagunar. Comprende las unidades geomorfológicas que se generan debido a los procesos de erosión fluvial, es decir de las corrientes de los ríos San Lope, Puraré Casanare, Tocoragua, San Ignacio, Tame y de las quebradas Cano Puna Puna, Casirba, El Totumo, como también por el acopio y sedimentación de materiales en los sectores contiguos a dichas corrientes, abarcando los eventos que sucedan desde temporadas de grandes avenidas e inundación hasta temporadas secas donde la dinámica de las corrientes continuas es la habitual. A continuación se puede observar la información pertinente a las unidades presentes en este ambiente y la representación gráfica de sus porcentajes (Tabla 8) y (Fig. 17).

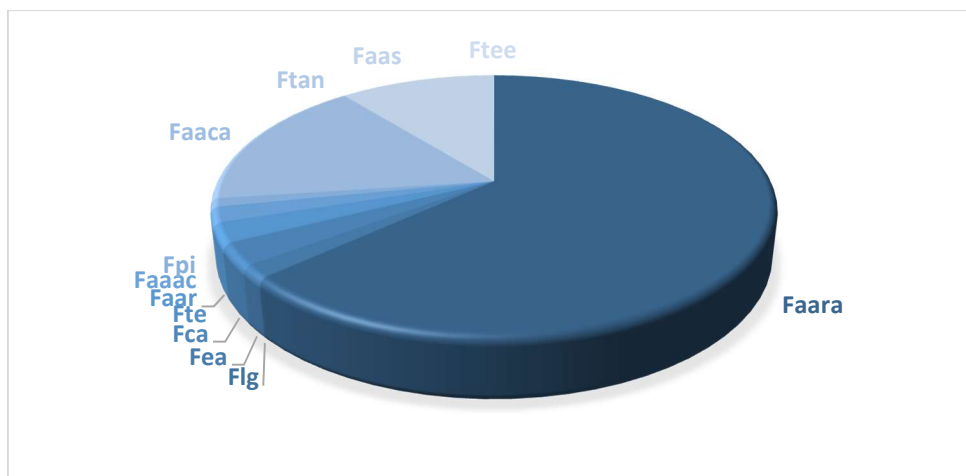


Fig. 17 Distribución de las unidades morfogénicas presentes en el ambiente fluvial.

Tabla 8.

Unidades morfogénicas del ambiente fluvial.

CÓDIGO	UNIDADES	ÁREA [Km ²]	PORCENTAJE DEL ÁREA TOTAL (%)
Faara	Abanico aluvial remanente antiguo	1035	57.94
Faaca	Abanico aluvial coalescente antiguo	267.3	14.96
Faas	Abanico aluvial sub-reciente	174.37	9.76
Fca	Cauce aluvial	44.57	2.49
Faar	Abanico aluvial remanente	39.96	2.23
Faaac	Abanico aluvial actual	30.78	1.72
Fea	Escarpe de abanico fluvial	24.92	1.39
Fpi	Plano o llanura de inundación	17.1	0.95
Flg	Laguna	1.64	0.09
Ftan	Terraza de acumulación antigua	1.53	0.08
Ftee	Escarpe de terraza de erosión	1.38	0.07
Fte	Terraza de erosión	1.02	0.05

- **Abanico Aluvial Remanente Antiguo (Faara)**

Se encuentra ubicado en el sector este de la zona de estudio. Es un área en forma de cono, que presenta laderas cóncavas a convexas de morfología plana, se caracteriza por estar dividido en zona proximal (donde se encuentra el ápice), media y distal. Se forma cuando una corriente en un rompimiento de pendiente desemboca en la base de una ladera o de un frente montañoso, generando

así una acumulación fluvial en forma radial en la zona plana. Los canales suelen ser más profundos en el ápice del abanico y más someros en la parte distal.

Esta clasificación se usa para describir el abanico que se caracteriza por ser un relicto de un depósito antiguo, por lo cual no es posible determinar con exactitud la zona que lo conforma y además se reconoce por su relieve irregular, que se genera debido a procesos de erosión fluvial los cuales dejan cauces inactivos y abandonados en el depósito. Esta característica puede describir un abanico de mayor edad. Esta unidad alcanza una longitud de 53.88 km y un ancho de 23.12 km, ocupa un área de 1035.00 km² la cual representa el 57.94% del área total de estudio.

- **Abanico Aluvial Coalescente Antiguo (Faaca)**

En el sector oeste de la zona de estudio se encuentra localizada esta unidad. Se define como un área en forma de cono, que presenta laderas cóncavas a convexas de morfología plana, se caracteriza por estar dividido en zona proximal (donde se encuentra el ápice), media y distal. Presenta características morfológicas semejantes a los abanicos Faara, se diferencia en factores como, mayor edad en los abanicos, por lo cual presentan un alto grado de incisión y describe además de esto, abanicos que presentan características similares que se pueden relacionar con otros abanicos coetáneos. Su tamaño varía desde longitudes de 19.00 a 28.25 km y su ancho de 10.35 a 17.00 km, esta unidad comprende un área de 267.30 km² que representa el 14.96% del área total de estudio.

- **Abanico Aluvial Sub-reciente (Faas)**

Se encuentra ubicado en el sector oeste de la zona de estudio. Es un área en forma de cono, que presenta laderas cóncavas a convexas de morfología plana, se caracteriza por estar dividido en zona proximal (donde se encuentra el ápice), media y distal. Sus características morfológicas son similares a la del abanico Faara y se diferencia en su distribución y temporalidad que describe

abanicos de edades relativamente intermedias. Esta unidad presenta indicios de procesos de incisión que llevan determinado tiempo desarrollándose, aun así, es posible diferenciar la superficie del ápice. Su tamaño varía desde longitudes de 10.99 a 19.82 km y de ancho de 1.71 a 9.28 km. Esta unidad comprende un área de 174.37 km² que representa el 9.76% del área total de estudio.

- **Abanico Aluvial Remanente (Faar)**

Se encuentra localizado al sur del municipio de Tame, Arauca. Se define como área en forma de cono, que presenta laderas cóncavas a convexas de morfología plana, se caracteriza por estar dividido en zona proximal (donde se encuentra el ápice), media y distal. Presenta características morfológicas semejantes a los abanicos Faara, este abanico se diferencia por ser pequeños relictos de depósitos antiguos que estuvieron presentes en el área, por lo cual no es posible determinar con exactitud las zonas que lo conforman y el contorno en su totalidad. Su tamaño varía desde longitudes de 1.02 a 10.98 km y un ancho de 0.44 a 3.93 km, esta unidad comprende un área de 39.96 km² que representa el 2.23% del área total de estudio.

- **Abanico Aluvial Actual (Faaac)**

Está ubicado al sureste del municipio de Tame, Arauca. Es un área en forma de cono, que presenta laderas cóncavas a convexas de morfología plana, se caracteriza por estar dividido en zona proximal (donde se encuentra el ápice), media y distal. Sus características morfológicas son similares a la del abanico Faara y se diferencia en su distribución y temporalidad que describe abanicos de menor edad relativa, esta unidad no presenta rastros de procesos de incisión o erosión superficial (cárcavas y surcos). Su tamaño en el área de estudio alcanza un largo de 16.94 km y un ancho de 5.22 km, esta unidad comprende un área de 30.78 km² la cual representa el 1.72% del área total de estudio.

- **Escarpe de Abanico Fluvial (Fea)**

Se encuentra localizado al este del área de estudio. Es un plano subvertical de longitudes cortas, cóncavo a convexo, se presenta en los bordes de la superficie del abanico y se genera debido a procesos de incisión y erosión de la red de drenaje. Estos escarpes en la zona de estudio, se caracterizan por estar bordeando los abanicos, muestran diferentes longitudes entre 31 a 371 m y un índice de relieve relativo que varía entre 10 – 80 m, esta unidad ocupa un área de 24.92 km² la cual equivale a 1.39% del área total de estudio.

- **Cauce Aluvial (Fca)**

Los cauces están distribuidos en sentido oeste - este en el área de estudio. Esta unidad está definida como un canal de formar irregular que se ha generado debido a la erosión de las corrientes fluviales, las cuales pueden ser continuas o estacionales, dicho canal se puede encontrar dentro de macizos rocosos y/o sedimentos aluviales. En base a factores como carga de sedimentos, caudal, pendiente y resistencia del lecho, estos cauces pueden perdurar a lo largo de grandes distancias. Los cauces meándricos como los ríos San Lope, Puraré Casanare, Tocoragua, San Ignacio, Tame y las quebradas Cano Puna Puna, Casirba, El Totumo, están relacionados a zonas planas (llanuras aluviales). Esta unidad comprende un área de 44.57 km² que representa el 2.49% del área total de estudio.

- **Plano o Llanura de Inundación (Fpi)**

Esta unidad está distribuida al suroeste del municipio de Tame, Arauca. Es un área de morfología plana, baja a ondulada, que puede o no inundarse. Se encuentra siempre cercana a los cauces fluviales de los ríos San Lope, Puraré Casanare, Tocoragua, San Ignacio, Tame y de las quebradas Cano Puna Puna, Casirba, El Totumo, prácticamente en la zona contigua a ellos, y en ocasiones

está limitada por escarpes de terraza. Su depósito está constituido por sedimentos finos, originados durante eventos de inundación fluvial. Esta unidad comprende un área de 11.10 km² que representa el 0.95% del área total de estudio.

- **Laguna (Flg)**

Está ubicada al sur del municipio de Tame, Arauca. Es un depósito natural de agua de menores dimensiones respecto a los lagos. La profundidad de esta unidad es variante debido a las condiciones ambientales de la zona y a su grado de acumulación de sedimentos. La laguna para el área de estudio se genera debido a la acción de fuerzas tectónicas, las cuales crean depresiones mediante plegamientos de las rocas de la Formación Caja, estas depresiones se inundan durante la época de alta pluviosidad y pueden permanecer incluso en épocas secas ya que son pobremente drenadas. En la zona de estudio esta unidad presenta un largo de 1.36 km y un ancho de 1.38 km, ocupa un área de 1.64 km² que equivale al 0.09% del área total de estudio.

- **Terraza de Acumulación Antigua (Ftan)**

Localizada al sur del municipio de Tame, Arauca. Es una superficie alomada que forma un depósito de gran extensión, con laderas largas, cóncavas a convexas. Su origen está relacionado a la disección y tectonismo de abanicos y planicies aluviales antiguas. Su depósito está constituido por gravas, arenas y arcillas. Sus dimensiones en el área de estudio representan una longitud de 1.85 km y un ancho de 1.86 km, esta unidad comprende un área de 1.35 km² la cual representa el 0.08% del área total de estudio.

- **Terraza de Erosión (Fte)**

Ubicada al este del área de estudio. Superficie elongada, plana a suavemente ondulada, bordeada por escarpes de diferente altura, que se presenta usualmente a lo largo del cauce del río Tocoragua. Se genera debido a procesos de erosión aluvial lateral y procesos de levantamiento tectónico debido a las fallas del Borde Llanero, Paz de Ariporo y Casirvita que afectan el sustrato rocoso. Sus dimensiones en la zona de estudio representan una longitud de 2.02 km y un ancho de 0.55 km, esta unidad comprende un área de 1.02 km² la cual representa el 0.05% del área total de estudio.

- **Escarpe de Terraza de Erosión (Ftee)**

Localizado al este del área de estudio. Es un plano vertical a subvertical, escalonado, que se ubica en el contorno de las terrazas aluviales de erosión. Se genera debido a la incisión y profundización del cauce sobre el estrato rocoso. Sus dimensiones en la zona de estudio representan una longitud de 0.02 km y un índice de relieve relativo de 80 m, esta unidad comprende un área de 1.38 km² la cual representa el 0.07% del área total de estudio.

8.4.2. Ambiente denudacional. Está compuesto por todas aquellas unidades geomorfológicas cuyo origen está directamente controlado por el efecto de los fuertes procesos de erosión, meteorización y transporte de sedimentos, lo cuales moldean y crean nuevas geoformas. Las unidades geomorfológicas denudacionales presentes en el área de estudio son 13, las cuales representan un área de 137.39 km² que corresponde al 7.7% del área total de estudio (Tabla 9) y (Fig. 18).

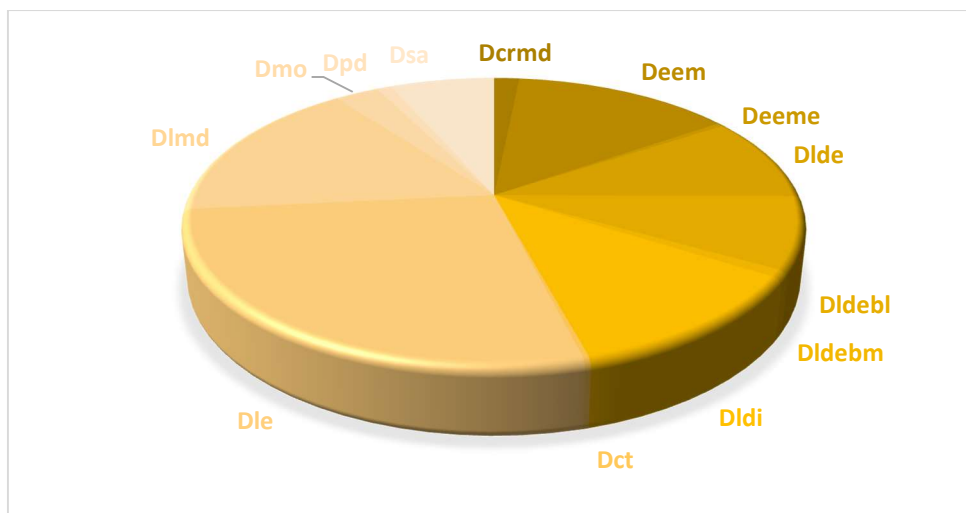


Fig. 18 Distribución de las unidades morfogénicas presentes en el ambiente denudacional.

Tabla 9.

Unidades morfogénicas del ambiente denudacional.

CÓDIGO	UNIDADES	ÁREA [Km ²]	PORCENTAJE DEL ÁREA TOTAL (%)
Dle	Ladera erosiva	37.38	2.09
Dlmd	Lomeríos muy disectados	22.38	1.25
Deem	Escarpe de erosión mayor	18.79	1.05
Dldi	Lomeríos disectados	16.21	0.9
Dlde	Lomo denudado	12.94	0.72
Dldebl	Lomo denudado bajo de longitud larga	11.15	0.62
Dsa	Superficie de erosión o aplanamiento	9.05	0.5
Dmo	Montículo y ondulaciones denudacionales	3.84	0.21
Dcrmd	Colina residual muy disectada	2.15	0.12
Dpd	Pedimentos	1.31	0.07
Dldebm	Lomo denudado bajo de longitud media	1.15	0.06
Deeme	Escarpe de erosión menor	0.63	0.03
Dct	Cono de talus	0.36	0.02

- **Ladera Erosiva (Dle)**

Se encuentra ubicada al oeste del área de estudio y se identifica por la presencia de pendientes muy inclinadas a escarpadas, de longitudes medias a muy largas, con formas que varían entre cóncavas

y convexas, se caracteriza por el fuerte efecto erosivo que se evidencia en las superficies, generando cárcavas y surcos. El índice de relieve relativo de esta unidad varía desde 50 a 200 m, con longitudes de 507 - 1732 m. Esta unidad ocupa 37,38 km² que representan un 2.09% del área total de estudio.

- **Lomeríos muy Disectados (Dlmd)**

Se localizan en los alrededores del río Puraré y la Quebrada el Totumo. Son elevaciones topográficas que presentan formas alomadas, con cimas redondeadas, con laderas cortas a largas, que pueden ser cóncavas y convexas, también se caracterizan por sus altas pendientes e índice de relieve bajo. Esta unidad se genera debido a los fuertes procesos denudacionales que modifican sus laderas con alta disección. Esta unidad representa un área de 22.38 km² que equivalen al 1.25% del área total de estudio.

- **Escarpe de Erosión Mayor (Deem)**

Se encuentra ubicado al sureste del municipio de Tame, Arauca. Comprende laderas con fuertes pendientes, en las cuales se observan cambios de alturas bastante pronunciados, se caracteriza por la presencia de eventos erosivos, los cuales han ido moldeando la unidad a través del tiempo y es el principal factor de su origen, sumado a procesos gravitacionales y tectógenos. Estos escarpes presentan en la zona de estudio diferentes dimensiones desde longitudes entre 95 a 656 m y un índice de relieve relativo que varía entre 25 – 150 m. Esta unidad ocupa un área de 18,79 km² la cual equivale a 1.05% del área total de estudio.

- **Lomeríos Disectados (Dldi)**

Localizados al sureste del municipio de Tame, Arauca. Son elevaciones topográficas que presentan formas alomadas, con cimas redondeadas, con laderas cortas a largas, que pueden ser cóncavas y

convexas, también se caracterizan por sus altas pendientes e índice de relieve bajo. Esta unidad se genera debido a los procesos denudacionales que modifican sus laderas con moderada disección. Esta unidad ocupa 16.21 km² que representan el 0.90% del área total de estudio.

- **Lomo Denudado (Dlde)**

Se encuentra ubicado al oeste del área de estudio. Son conjuntos de lomos que presentan una alta variación de alturas, se caracterizan por su forma alargada en dirección perpendicular al drenaje principal. Su zona superior presenta diferentes configuraciones debido a la incisión del drenaje y a los fuertes procesos erosivos que han afectado esta unidad. Esta geoforma ocupa 12.94 km² que equivalen al 0.72% del área total de estudio.

- **Lomo Denudado Bajo de Longitud Larga (Dldebl)**

Localizado al sureste del municipio de Tame, Arauca. Son conjuntos de lomos que presentan una variación de alturas. En el área de estudio se presenta un índice de relieve relativo desde 20 a 100 m y una longitud del eje principal de 1142 m hasta 3379 m, se caracterizan por su forma alargada en dirección perpendicular al drenaje principal. Su zona superior presenta diferentes configuraciones debido a la incisión del drenaje y a los fuertes procesos erosivos que han afectado esta unidad. Esta geoforma ocupa 11.15 km² que equivalen al 0.62% del área total de estudio.

- **Superficie de Erosión o Aplanamiento (Dsa)**

Se encuentra ubicada cerca de la Quebrada el Totumo. Se define como extensión plana, elevada y basculada, que se genera a causa de fuertes e intensos procesos denudacionales y de meteorización. En la zona de estudio esta unidad presenta longitudes que varían desde 237 a 4389 m y amplitudes que van desde 225 a 2440 m, ocupa un área de 9.05 km² que equivale al 0.50% del área total de estudio.

- **Montículo y Ondulaciones Denudacionales (Dmo)**

Están localizadas en los alrededores de la Quebrada El Totumo. Son prominencias topográficas del terreno con formas colinadas, cóncavas o convexas de pendientes suaves. En el área de estudio se presentan índices de relieve relativo desde 10 hasta 35 m y longitudes desde 290 hasta 2770 m. Se generan debido a procesos de meteorización y erosión intensa sobre areniscas de grano fino a medio, de composición cuarzosa, con capas de lodolitas y arcillolitas (Formación Caja). Esta unidad ocupa 3.84 km² que equivalen al 0.21% del área total de estudio.

- **Colina Residual muy Disectada (Dcrmd)**

Está ubicada al sur del municipio de Tame, Arauca. Es una elevación del terreno que se caracteriza por la presencia de una cima redondeada delimitada por laderas que varían de longitudes cortas a largas, con formas convexas con altas pendientes. Su origen se debe a procesos denudativos continuos y a la meteorización constante. En la zona de estudio se observa una unidad morfogénica perteneciente a esta clasificación, la cual representa un área de 2.15 km² que equivale al 0.12% del área total de estudio. Presenta un relieve relativo de 130 m y una longitud de 1770 m.

- **Pedimentos (Dpd)**

Esta unidad está ubicada al sur de la zona de estudio. Es un área de erosión que se origina en resistentes unidades rocosas la cual fomenta una capa de aluviones que puede tener diferentes espesores. Se caracteriza por tener pendientes muy suaves. En la zona de estudio esta unidad presenta longitudes que varían desde 273 a 367 m y amplitudes que van desde 524 a 4086. Ocupa un área de 1.31 km² que equivale al 0.07% del área total de estudio.

- **Lomo Denudado Bajo de Longitud Media (Dldebm)**

Están localizados al sureste del municipio de Tame, Arauca. Son conjuntos de lomos que presentan una variación de alturas. En el área de estudio presentan un índice de relieve relativo desde 20 a 60 m y una longitud del eje principal variando desde 312 hasta 800 m, se caracterizan por su forma alargada en dirección perpendicular al drenaje principal. Su zona superior presenta diferentes configuraciones debido a la incisión del drenaje y a los fuertes procesos erosivos que han afectado esta unidad. Esta geoforma ocupa un área de 1.15 km² que equivale al 0.06% del área total de estudio.

- **Escarpe de Erosión Menor (Deeme)**

Se encuentra ubicado al sureste del municipio de Tame, Arauca. Comprende laderas con fuertes pendientes, en las cuales se observan determinados cambios de alturas, se caracteriza por la presencia de erosión menor, la cual ha ido moldeando de manera suave la unidad a través del tiempo y es el principal factor de su origen, también se generan debido a los procesos gravitacionales y tectógenos. Estos escarpes presentan longitudes entre 84 a 616 m y un índice de relieve relativo que varía entre 20 – 80 m. Esta unidad ocupa un área de 0.63 km² la cual equivale a 0.03% del área total de estudio.

- **Cono de Talus (Dct)**

Está ubicado al sur de la zona de estudio. Son conos o lóbulos localizados en la parte inferior de los escarpes, su superficie se encuentra dividida entre su reducido ápice y el cuerpo del lóbulo de mayores dimensiones, este cuerpo presenta marcados cambios de pendiente y su origen está asociado a procesos de acumulación de fragmentos que se desprenden de las zonas superiores del escarpe, también se genera debido a la presencia de actividad tectónica. Esta unidad

geomorfológica abarca un área de 0.36 km² la cual representa el 0.02% del área total de estudio, presenta un ancho entre 113 – 332 m y largo entre 212 – 418 m.

8.4.3. Ambiente antrópico. Comprende aquellas unidades geomorfológicas que se generan como producto de las actividades humanas sobre el terreno, entre las cuales se encuentran construcciones, urbanizaciones, obras de ingeniería e industria. A continuación, se describen las unidades morfogenéticas presentes en el área de estudio, donde se evidencia la unidad morfológica correspondiente al centro poblado que representa el 0.51% del área total (Tabla 10).

Tabla 10.

Unidades morfogenéticas del ambiente antrópico.

CÓDIGO	UNIDADES	ÁREA [Km ²]	PORCENTAJE DEL ÁREA TOTAL (%)
Acp	Centro poblado	9.25	0.51

- **Centro Poblado (Acp)**

Se encuentra ubicado al norte del área de estudio. Se define como concentración de viviendas en un sector del terreno con presencia de características tales como la delimitación de vías vehiculares y peatonales. En la zona de estudio se encuentra solo un centro poblado, que hace alusión al municipio de Tame, Arauca, esta unidad tiene un área de 9.25 km² la cual representa el 0.51 % del área total de estudio.

A partir de las descripciones e interpretación realizada se muestran los mapas de componentes morfogenéticos del área de estudio en los cuales se evidencia toda la información. Dando inicio el AB1 (Fig. 19) es un abanico aluvial coalescente que presenta 5 unidades de tipo fluvial y 11 unidades de tipo denudacional, siendo este último ambiente producto de los eventos

tectónicos que han afectado la morfología del abanico. El AB2 y AB3 (Fig. 20) son abanicos aluviales sub-recientes, en los cuales se encuentran 5 unidades fluviales, se identifican porque presentan una leve incisión casi nula en su superficie. El AB4 (Fig. 21) es un abanico aluvial coalescente antiguo que se encuentra conformado por 5 unidades de tipo fluvial y 11 unidades de tipo denudacional, es muy similar al AB1 con el cuál se encuentra relacionado por la presencia de procesos de incisión en su zona más distal. El AB5 (Fig. 22) es un abanico aluvial sub-reciente, se encuentra conformado por 3 unidades del ambiente fluvial y una unidad del ambiente antrópico, siendo esta última el centro poblado del municipio de Tame, Arauca, este depósito al igual que el AB2 y AB3 se caracteriza por la presencia de una leve incisión en el área. El AB6, AB7, AB8 Y AB9 (Fig. 22) son abanicos aluviales remanentes que están afectados únicamente por el ambiente fluvial, presenta 3 unidades de este tipo, se caracterizan por no tener definido su contorno y no tener claridad en sus zonas proximal, media y distal. El AB10 (Fig. 23), es un abanico aluvial remanente antiguo, que se caracteriza por el fuerte efecto de la erosión fluvial, que deja indicios de aquellos cauces inactivos y abandonados que generan aspecto de relieve irregular, está compuesto por 2 unidades de tipo fluvial. Finalmente, el AB11 (Fig. 22) corresponde al abanico aluvial actual el cual esta únicamente constituido por 2 unidades de tipo fluvial, como su nombre lo indica es el abanico más reciente y menos afectado por los distintos procesos de erosión.

8.5.V Etapa: Análisis Y Evaluación Final

Los análisis e interpretación de los resultados obtenidos se explican en capítulo de resultados (Capítulo 9).

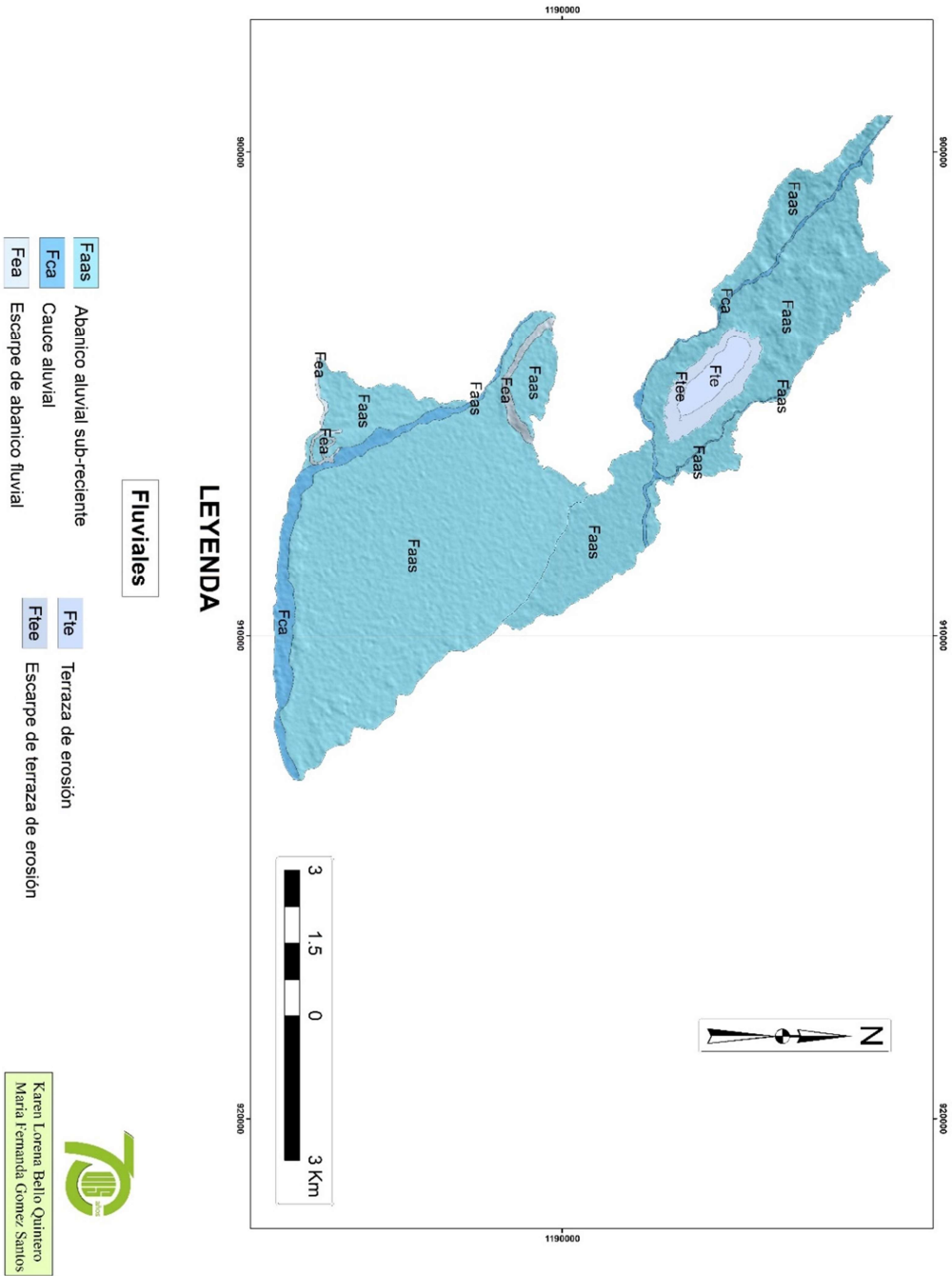


Fig. 20 Mapa geomorfológico del AB2 y AB3 (abanicos aluviales sub-recipientes).

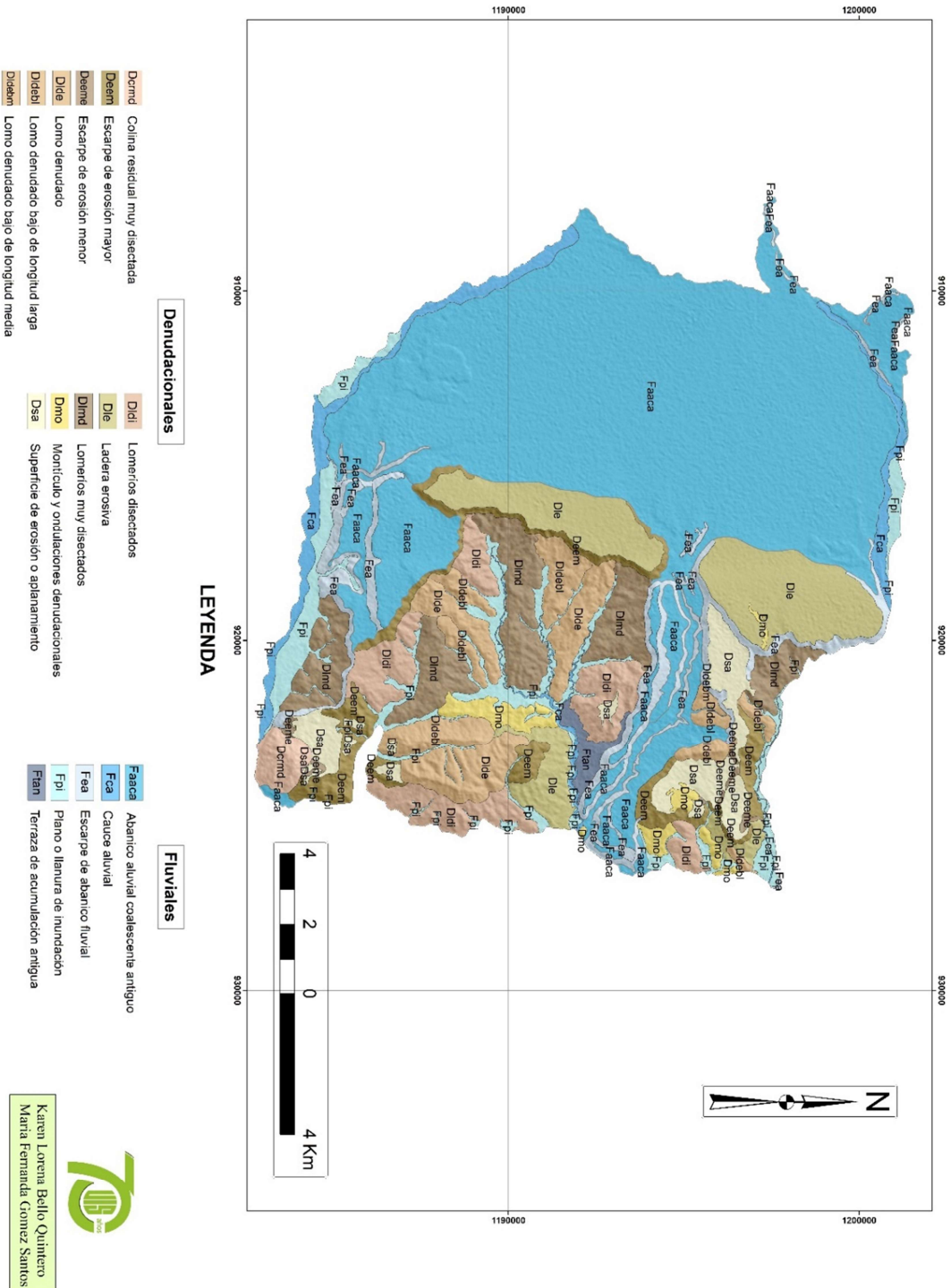


Fig. 21 Mapa geomorfológico del AB4 (abanico aluvial coalescente antiguo).

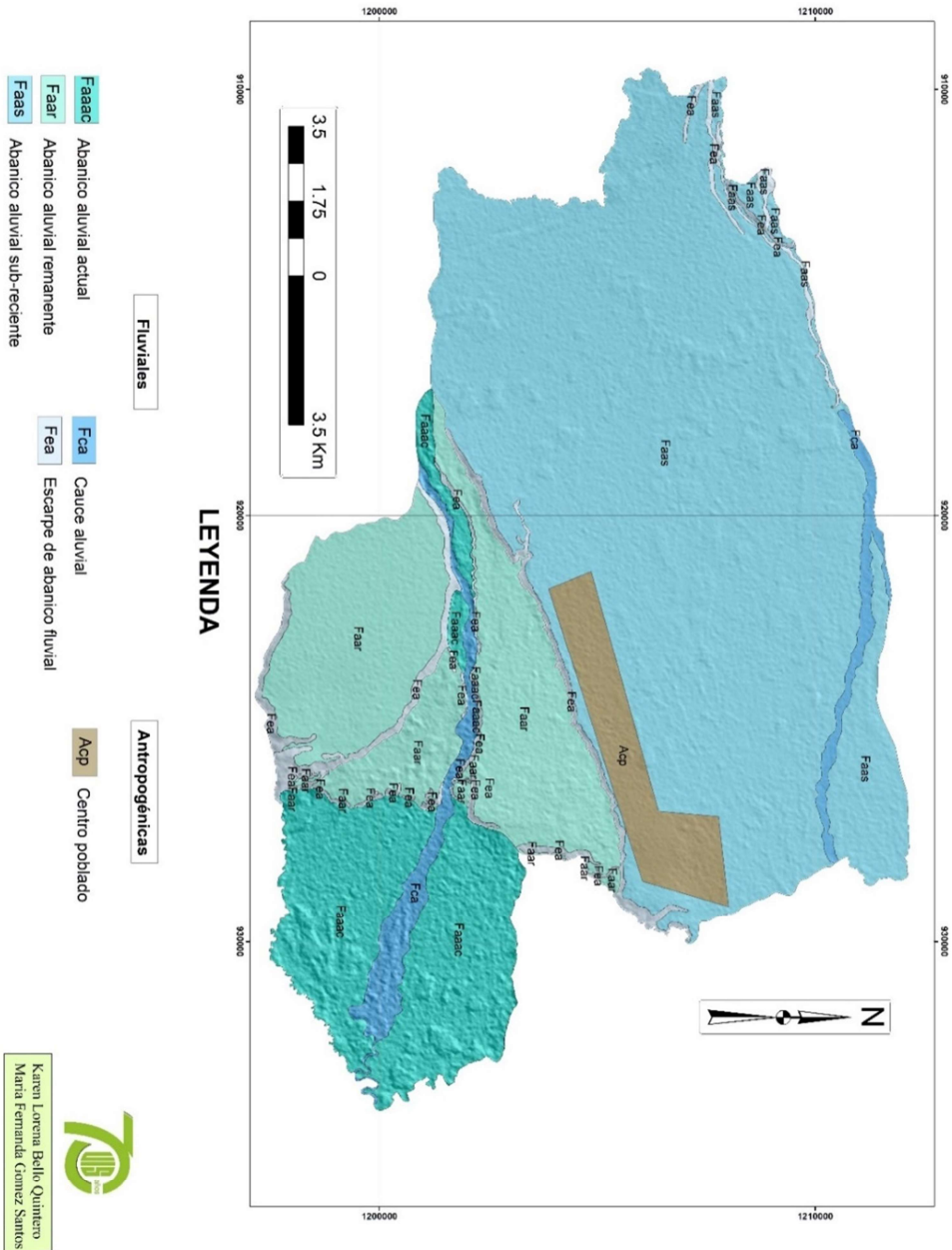


Fig. 22 Mapa geomorfológico del AB5 (abanico aluvial sub-reciente), AB6, AB7, AB8, AB9 (abanicos aluviales remanentes) y AB11 (abanico aluvial actual).


 Karen Lorenza Bello Quintero
 María Fernanda Gamiez Santos

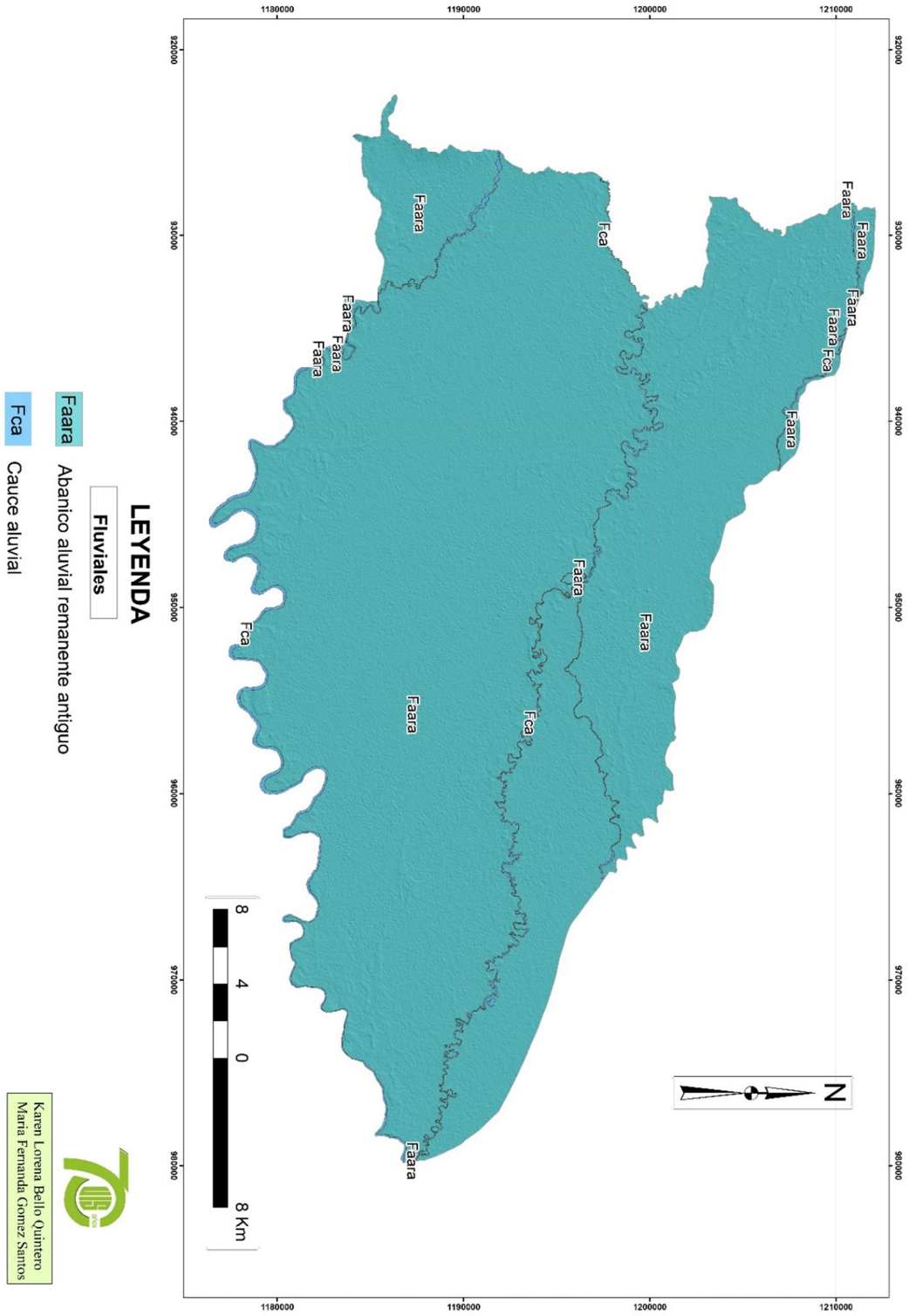


Fig. 23 Mapa geomorfológico del ABI10 (abanico aluvial remanente antiguo).

9. Resultados

La reconstrucción de la evolución morfogenética de la región de estudio que comprende los abanicos aluviales de piedemonte presentes entre los municipios de Tame y Hato Corozal los cuales inician con el Episodio I, éste se enmarca en el comienzo de la inversión y posterior levantamiento de la Cordillera Oriental Colombiana, hace aproximadamente 39 Millones de años, con la depositación sintectónica de los materiales erosionados de las cuencas origen, acumulados en la base más llana del frente montañoso, dando paso a la formación de pequeños conos de deyección. Lo anterior según estudios realizados por Morales, (1958), Cooper, (1995), Caballero *et al.*, (2010) y Sarmiento *et al.*, (2011) (Fig. 24).

El Episodio II está caracterizado por la formación de los abanicos AB₁, AB₄ y AB₅?, éste último inferido, ya que no se tiene un registro concreto y amplio de su formación, los cuales se desarrollaron a partir del aporte de material proveniente del frente montañoso. Tras el análisis morfogenético, estos depósitos son considerados coalescentes y se estima que su edad de formación sea coetánea (Fig. 25).

En el Episodio III se evidencia la influencia del sistema de fallas frontal de la cordillera oriental, del cual hacen parte las Fallas de Paz de Ariporo y el Sistema de Fallas del Borde Llanero (Montes & Sandoval, 2001), estas corresponden a fallas inversas las cuales inician su actividad estructural generando cambios morfológicos en los cuerpos de los abanicos, como el plegamiento de estos (Fig. 26).



Fig. 24 Episodio I de la Evolución Morfo-genética.

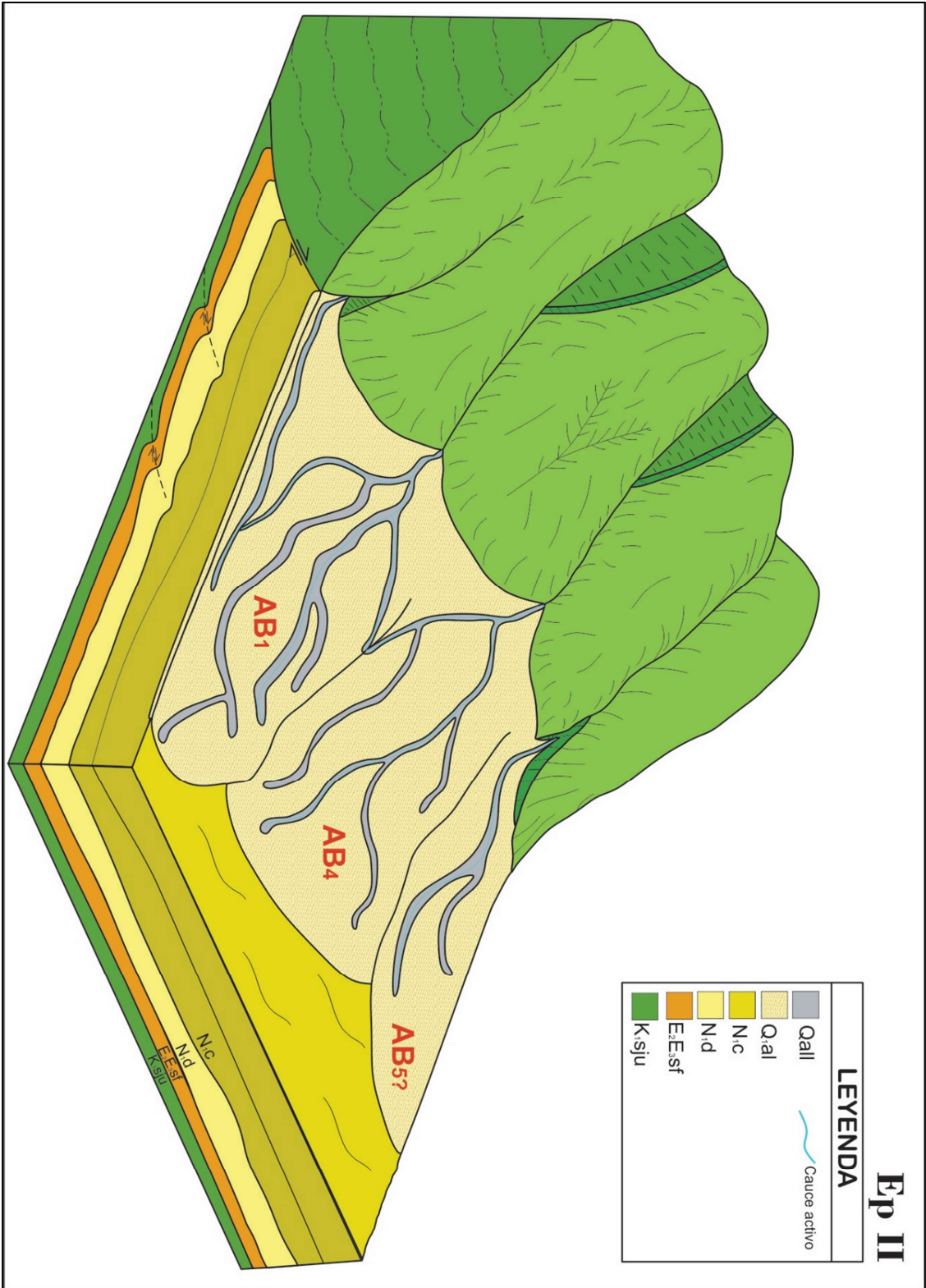


Fig. 25 Episodio II de la Evolución Morfo-genética.

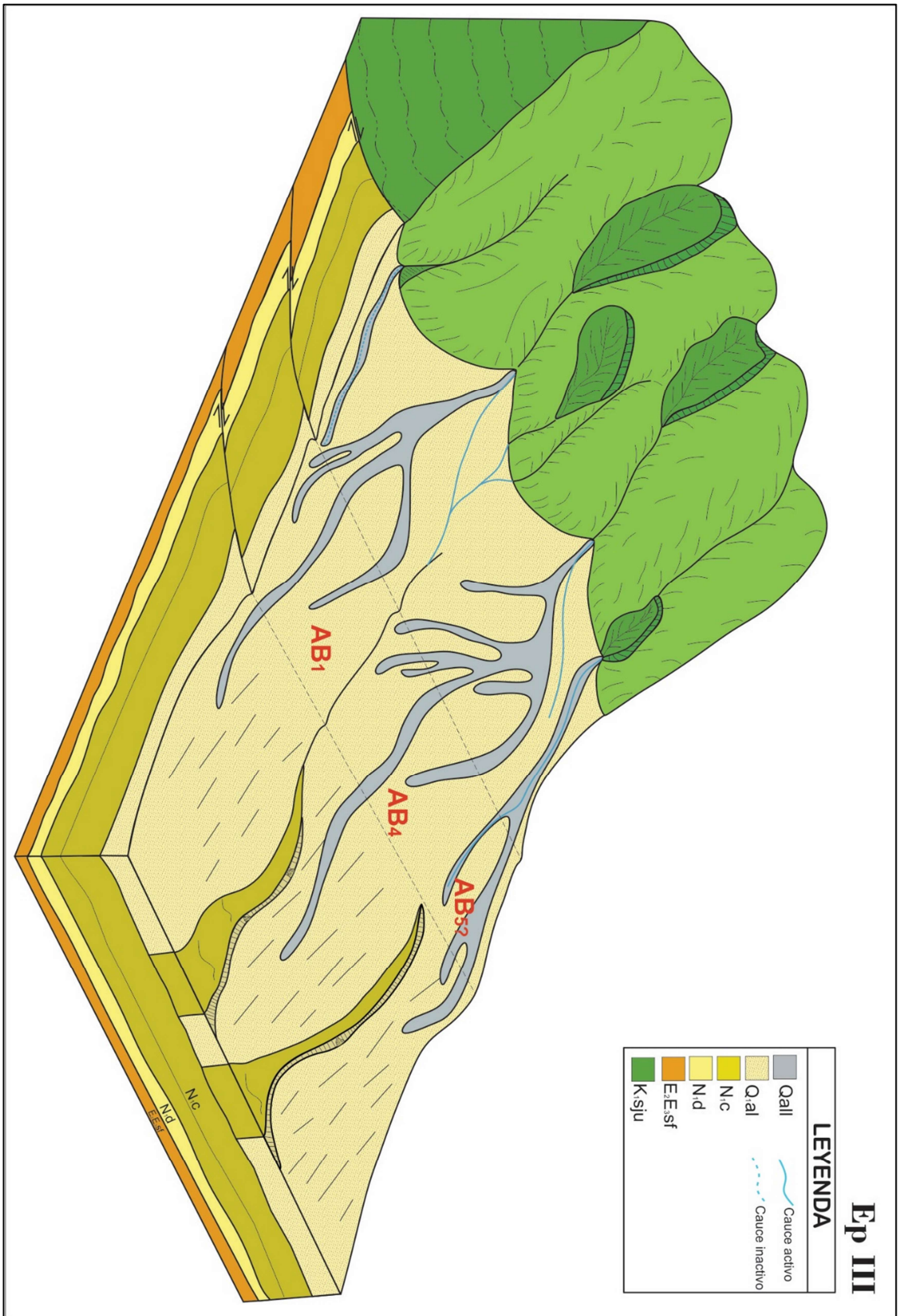


Fig. 26 Episodio III de la Evolución Morfo genética.

Para el IV Episodio, posterior al plegamiento, se genera el basculamiento de los abanicos coalescentes que se encontraban en la zona, llegando a poner en contacto unidades del Mioceno-Pleistoceno (Formación Caja), con unidades Cuaternarias, así mismo, este episodio se caracteriza por la erosión de estos cuerpos de depósitos que quedaron expuestos por el levantamiento influenciado por las fallas, dicho levantamiento genera una obstrucción para la depositación de los sedimentos que venían alojándose sobre estos cuerpos, por lo cual los drenajes desvían sus cauces hacia zonas de menor pendiente, dejando al descubierto pequeñas incisiones sobre los abanicos, indicando que éste era su canal antiguo. Mientras esto ocurría hacia las zonas medias de los abanicos preexistentes, un nuevo cono de deyección se fue formando en la base del frente montañoso, corresponde al denominado AB₂ (Fig. 27).

Durante el Episodio V se presentan eventos erosivos en el frente montañoso hacia la zona Norte del área de estudio, éstos dan paso a la formación de un nuevo depósito al cual se denominó AB₅, este cuerpo se acumula sobre el cuerpo del abanico AB₅?. Así mismo, inicia la formación del depósito AB₃, adyacente al abanico AB₂, el cual se encuentra en una etapa de formación limitada por los drenajes provenientes de las cuencas CC₁ y CC₄. Mientras se presentaba esta etapa de depositación, las zonas donde se produjo el basculamiento de los abanicos antiguos, siguió en su etapa erosiva, nuevas cárcavas se fueron formando y junto con ello generando geoformas denudacionales tales como lomos denudados (Dlde), laderas erosivas (Dle), escarpes de erosión mayor (Deem) y lomeríos muy disectados (Dlmd) (Fig. 28).

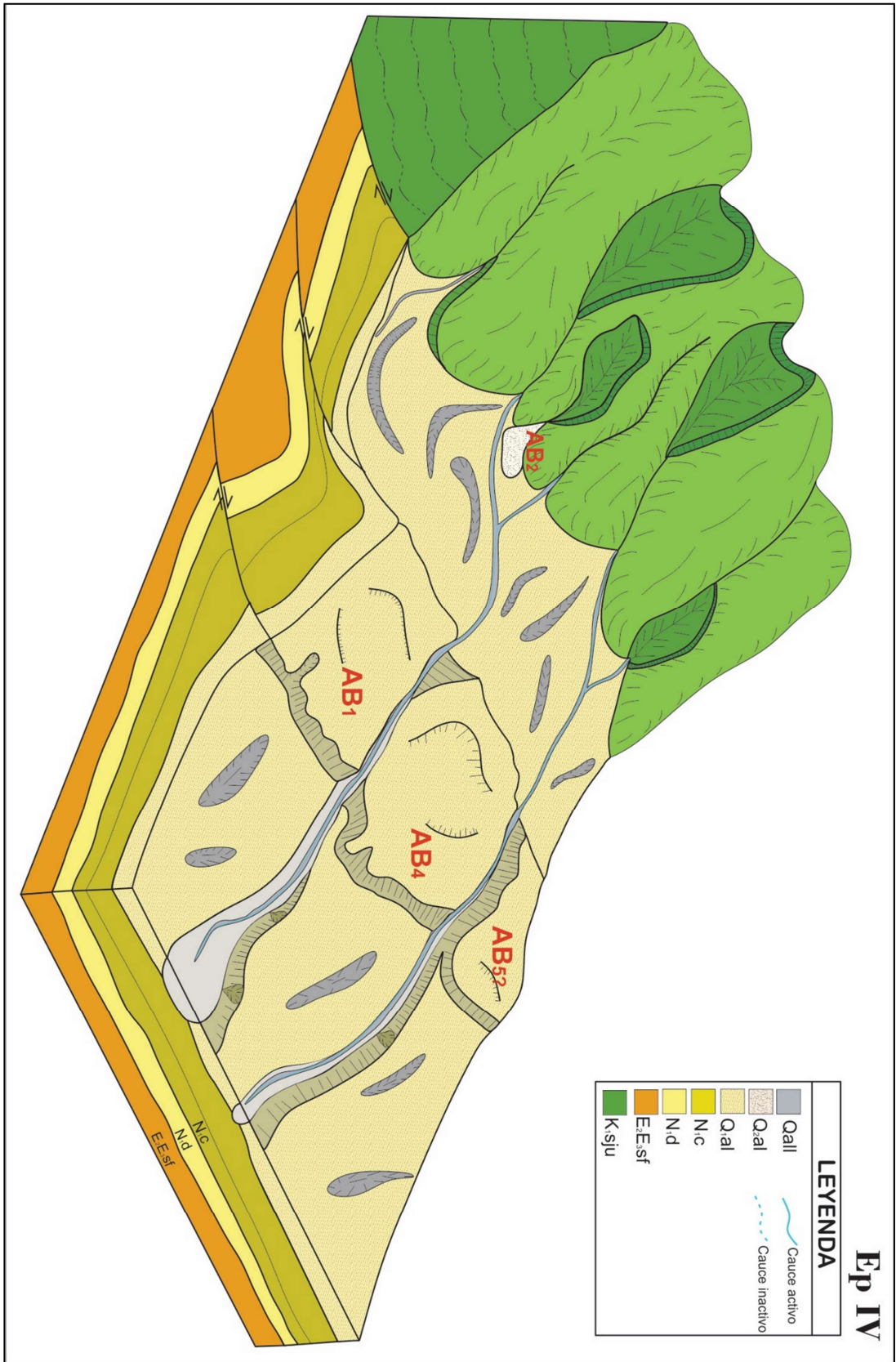


Fig. 27 Episodio IV de la Evolución Morfogenética.

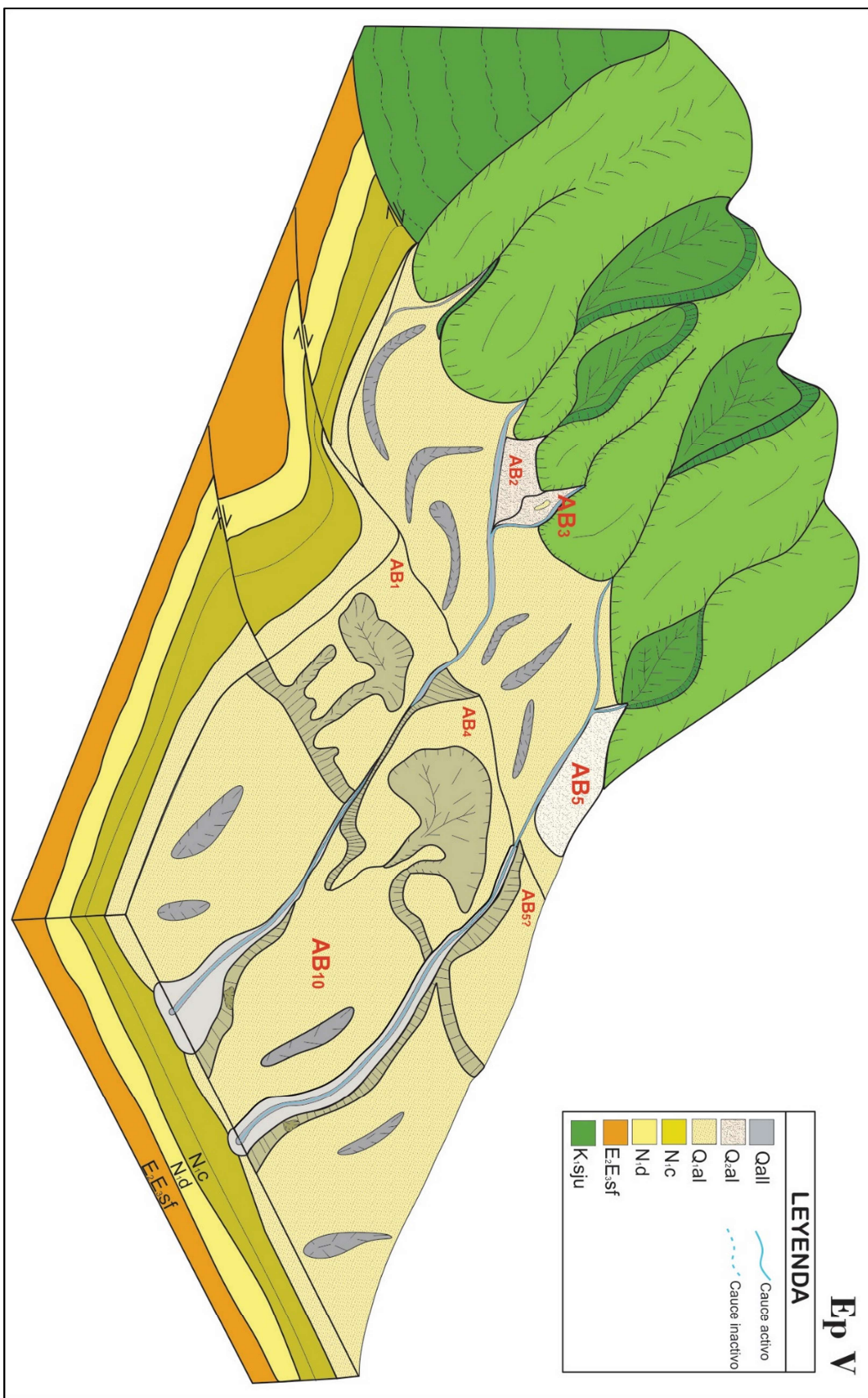


Fig. 28 Episodio V de la Evolución Morfogenética.

En el Episodio VI se ilustran los eventos erosivos que se han ido presentando en el frente montañoso, estos con un grado de incisión más fuerte en las cuencas origen, el material proveniente de la cuenca CC₅, fue depositado sobre un abanico antiguo, dando paso a la formación del AB₅, el cual logró cubrir gran parte de este depósito antiguo, esto se argumenta por las evidencias morfogénicas de este nuevo abanico, el cual no presenta afectación en su configuración inicial por efecto de las fallas de Paz de Ariporo ni del Borde Llanero, únicamente se ve reflejado el escarpe de abanico, el cual corresponde a un cambio abrupto de pendiente entre este depósito nuevo y su antecesor. Hacia la zona centro-oriente del área de estudio, continua a las regiones afectadas por las fallas, se presentan nuevas acumulaciones de material, estas ocurren producto de la migración de los drenajes a zonas de menor pendiente, en este caso formando el AB₆, el cual corresponde a un abanico telescópico cuyos materiales son transportados desde su área fuente, la cuenca CC₄, hasta zonas centro-distales de los abanicos antiguos, socavando dichos depósitos hasta encontrar un punto de equilibrio para su depositación. Durante este episodio la erosión por agentes fluviales principalmente en las zonas expuestas al levantamiento por efecto de las fallas siguió en aumento, llegando a erosionar parte de la Formación Caja, de edad Miocena, dejando a su paso una morfología característica de tipo denudacional y fluvial, ambas controladas por la fuerte erosión presente en la zona de estudio (Fig. 29).

El Episodio VII está enmarcado por fuertes eventos erosivos en el frente montañoso, a raíz de ello se presenta la depositación de un nuevo abanico telescópico denominado AB₉, el cual se aloja sobre el abanico AB₆ cubriendo gran parte de éste, quedando expuesto como remanentes de abanico antiguo (Fig. 30).

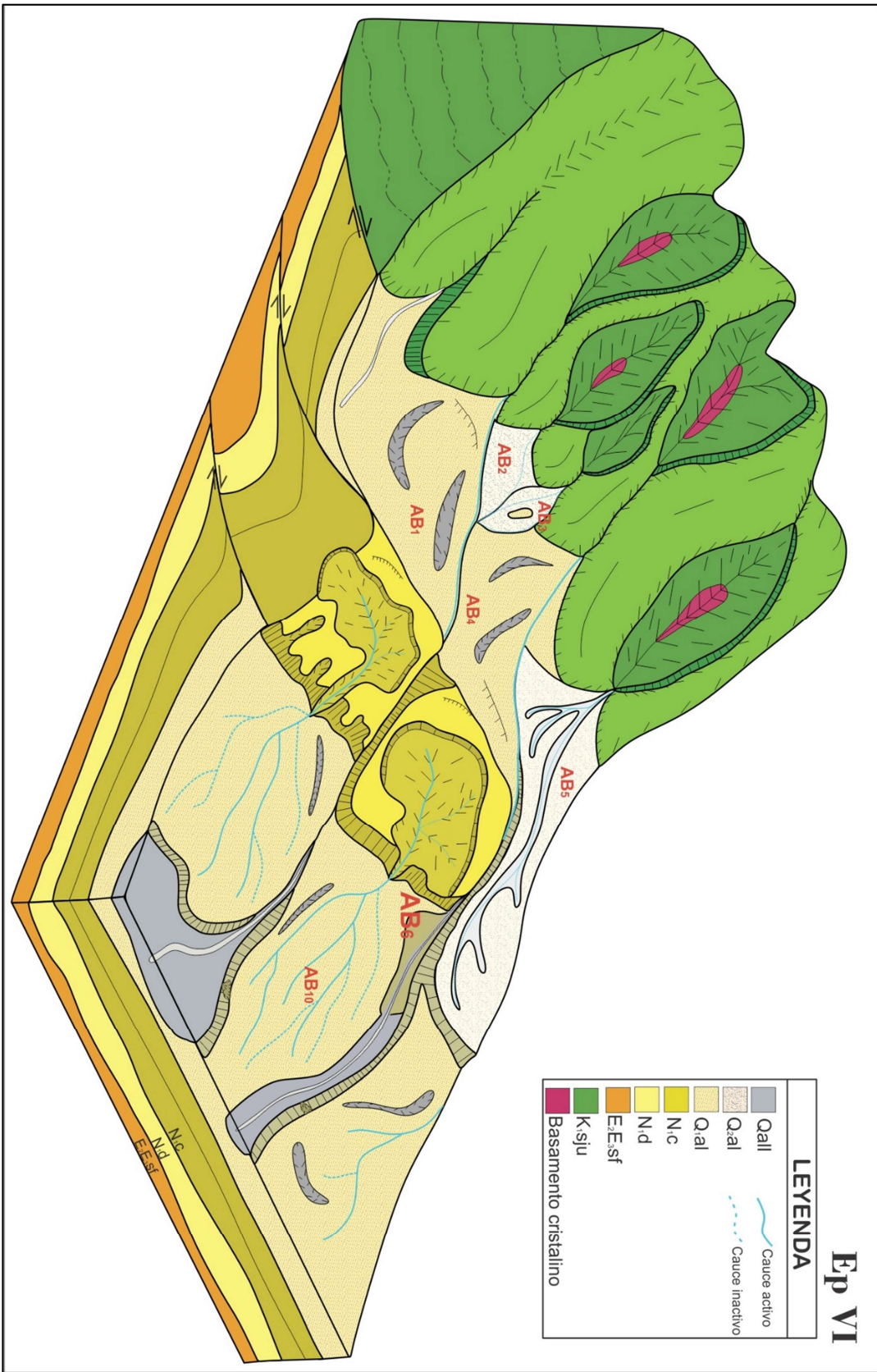


Fig. 29 Episodio VI de la Evolución Morfogenética.



Fig. 30 Episodio VII de la Evolución Morfogenética.

El Episodio VIII representa la etapa actual en la que se encuentra esta zona, en donde los abanicos AB₆ y AB₉, corresponden a remanentes de abanico antiguo debido al evento depositacional más reciente, el cual se alojó sobre el cuerpo de estos depósitos antiguos formando el abanico telescópico actual denominado AB₁₁, los materiales de este depósito provienen de la cuenca CC₄, al igual que para la formación de los abanicos AB₆ y AB₉, sus sedimentos atravesaron abanicos más antiguos al ser transportados por el Rio Tame hasta encontrar el punto de equilibrio para su depositación, así mismo se evidencia el avance erosivo en las zonas elevadas por las fallas, donde actualmente se encuentran geoformas tales como ladera erosiva (Dle), escarpe de erosión mayor (Deem), escarpe de erosión menor (Deeme), lomo denudado (Dlde), lomo denudado bajo de longitud larga (Dldebl), lomo denudado bajo de longitud media (Dldebm), lomeríos disectados (Dldi), lomeríos muy disectados (Dlmd), colina residual muy disectada (Dcrmd), Montículo y ondulaciones denudacionales (Dmo), superficie de erosión o aplanamiento (Dsa), pedimentos (Dpd), cono de talus (Dct) (Fig. 31). Las unidades geomorfológicas que se observan actualmente en el área de estudio son producto de procesos tectónicos que generaron levantamiento, lo cual hizo que empezaran a formarse y después a causa del efecto climático se presenta la erosión que afecta y moldea en una alta proporción estas unidades.

A partir de la reconstrucción de la evolución morfogenética, teniendo en cuenta la edad de formación de los depósitos aluviales estimada por Morales, (1958) y Cooper, (1995), junto al análisis de los resultados matemáticos obtenidos en la evaluación de los parámetros morfométricos, tanto en las cuencas de proveniencia como en los abanicos aluviales, se evaluó la tasa de erosión de dichos abanicos, dando como resultado un índice erosivo de 43.68 Km³/Ma.

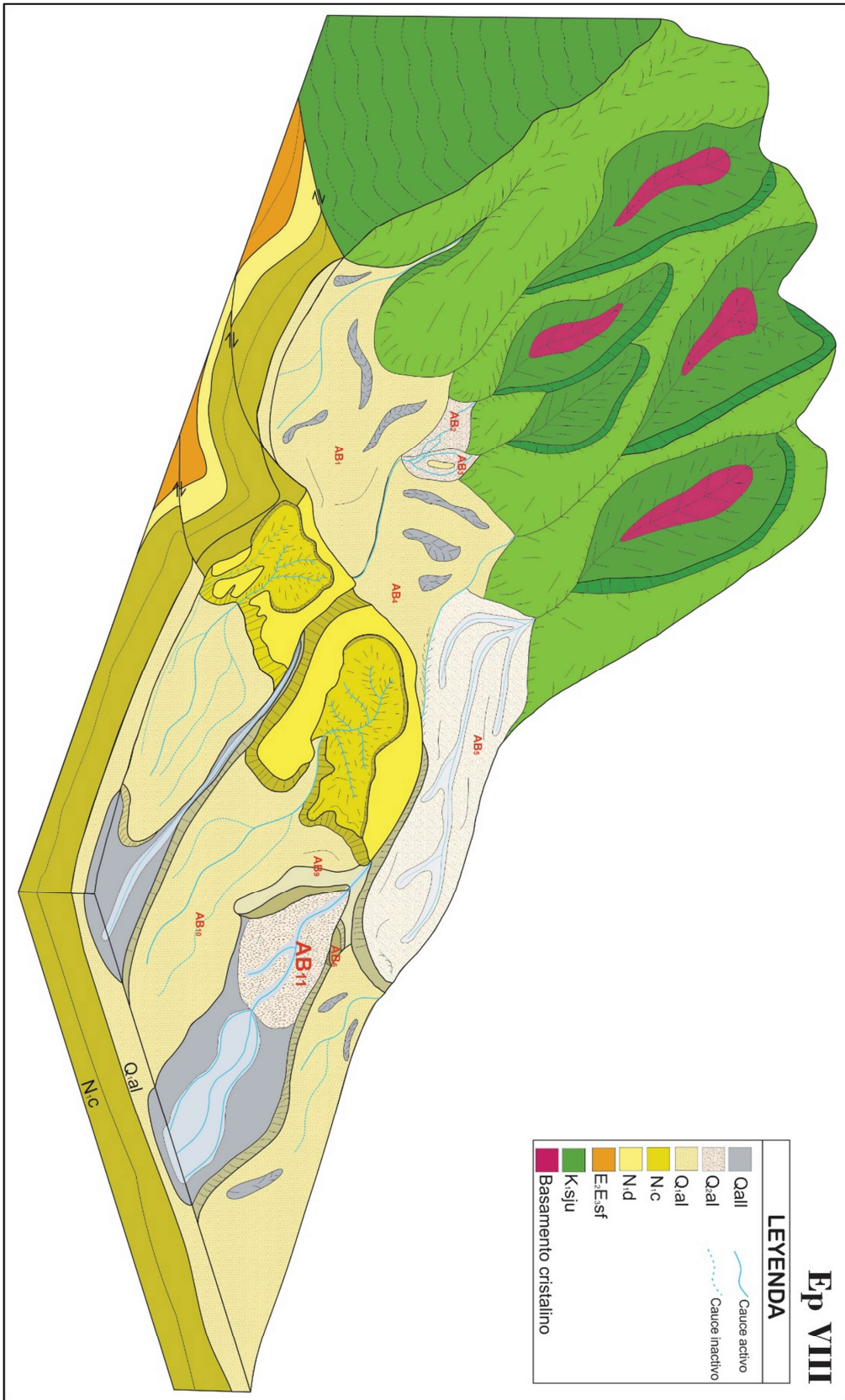


Fig. 31 Episodio VIII de la Evolución Morfo genética.

El mapa completo de las unidades morfogénicas permite identificar los diferentes tipos de ambientes geomorfológicos interpretados en la zona de estudio, así mismo, observar todas aquellas unidades presentes, su distribución y localización, este mapa es la unión de todos los abanicos aluviales previamente interpretados y se considera el resultado final de la interpretación geomorfológica (Fig. 32).

10. Discusión

La situación actual de los abanicos aluviales en Colombia se presenta en unas condiciones donde las descripciones morfogénicas no son muy relevantes ya que los estudios no profundizan en casos específicos dentro de estos. Entre algunos trabajos se encuentra Vargas *et al.*, (2008), el cual estudia la actividad tectónica y sísmica de la región comprendida por el Abanico Aluvial del Quindío, Armenia. En el caso de los abanicos aluviales de piedemonte, específicamente en el área de estudio, únicamente se tienen parámetros donde la geología a escalas mayores que describe el comportamiento de la formación de estos abanicos, pero a su vez, esta no es muy clara, colocando como ejemplo, los estudios realizados por el Servicio Geológico Colombiano en las memorias explicativas de las planchas 138, 139, 154 y 155, donde exponen de manera general las características morfológicas reconocidas, las cuales se dan como resultado de procesos endógenos y exógenos que fueron significativamente intensos durante la Orogenia Andina.

En el resultado de estos estudios se observan sólo dos tipos de ambientes geomorfológicos, estructural y fluvial, los cuales enmarcan 7 unidades, abanico aluvial (Faa), llanura de inundación (Fle), planicie de inundación (Fpi), terrazas de acumulación (Fpa), estructural plegado (Sp), estructural plegado anticlinal (Spa) y estructural plegado denudacional (Spd), las cuales fueron definidas a partir de la propuesta de estandarización de Carvajal (2011), pudiéndose observar que este análisis presenta poco detalle, esto debido a que dichas planchas fueron realizadas a una escala 1:100.000. El trabajo realizado en esta investigación, profundizó en las descripciones y análisis de los eventos evolutivos dentro de los parámetros morfométricos y morfológicos, dando así una amplia identificación e interpretación de 26 unidades geomorfológicas más específicas, distribuidas en 3 tipos de ambientes, fluvial, denudacional y antrópico. Cabe resaltar la diferencia existente entre ambientes geomorfológicos diferenciados en cada estudio, esto se debe al detalle de interpretación obtenido por las dimensiones espaciales manejadas en cada uno de ellos, siendo la del SGC de una proporción regional, donde priman los rasgos estructurales ocasionados por los efectos de las fallas en el área, caso contrario ocurre en la interpretación de éste trabajo, donde la escala manejada es local, permitiendo analizar cada rasgo denudacional sobreimpuesto en las unidades estructurales.

Para las edades de formación de estos depósitos, sólo se tiene un registro ambiguo de la datación relativa de los abanicos descrita por Morales, (1958), Cooper, (1995), Caballero *et al.*, (2010) y Sarmiento *et al.*, (2011), donde estiman estos cuerpos como producto de depósitos sintectónicos al evento de inversión y levantamiento de la Cordillera Oriental durante el Eoceno Tardío – Oligoceno Tardío, a partir de estos datos, se realiza el modelo evolutivo de la región de estudio, así mismo, se calcula su tasa de erosión.

Este índice erosivo evaluado para la zona de estudio en este proyecto, da como resultado un valor promedio y corresponde a una tasa erosiva variable, esto es justificado mediante los cambios climáticos globales que se han presentado a lo largo del tiempo geológico. Dichos cambios han experimentado una evolución importante y significativa. Trabajos como el de Zachos *et al.*, (2001), donde estudian las variaciones en los isótopos ^{18}O y ^{13}C en núcleos sedimentarios de aguas profundas, así como en el hielo de Groenlandia, han revelado tendencias graduales de calentamiento y enfriamiento (Fig. 33), impulsadas por procesos tectónicos, entre ellos el Rift del Atlántico Norte, la colisión de India con Asia, el levantamiento de los Himalaya, el levantamiento de Panamá y posterior cierre marítimo centroamericano, entre otros, así mismo, cambios orbitales tales como la excentricidad, oblicuidad y precesión, los cuales afectan la distribución y cantidad de energía solar incidente, dicho trabajo se enfoca en la reconstrucción climática desde la era Cenozoica. Por otra parte, Thomas (2008) y Baker & Fritz (2015), estudian las variaciones climáticas durante el Cuaternario en regiones tropicales y sub-tropicales, así como en Suramérica, este último, empleando el método de isótopos estables ^{18}O en espeleotemas (Fig. 34).

Desde principios de la década de los 70's, los datos de Isótopo ^{18}O han servido como el medio principal para reconstruir el cambio climático global y regional en una variedad de escalas geológicas de tiempo, desde milenarias hasta tectónicas (Zachos, *et al.*, 2001).

La estrecha relación entre el Isótopo ^{18}O y el clima está reflejada de forma proporcional, es decir, a menores temperaturas, se registra mayor cantidad de Isótopo ^{18}O , generando climas fríos o glaciación, así mismo a mayores temperaturas, los registros de Isótopo ^{18}O disminuyen, indicando climas cálidos. Estos cambios son conocidos como Eventos Dansgaard-Oeschger (D-O), corresponden a cambios en la temperatura de la tierra, los cuales inician con un calentamiento brusco (interestadiales), el cual puede durar entre 20 y 30 años, cuando éste alcanza su máximo $^{\circ}\text{T}$,

inicia el proceso de enfriamiento (estadales), éste puede durar entre 1500 y 5000 años (Cacho *et al.*, 1999). Durante los eventos interestadales se presenta mayor pluviosidad, generando que descargas fluviales aumenten y consigo los procesos de erosión, transporte y depositación de sedimentos, caso contrario ocurre durante los estadales, donde la sedimentación es casi nula, debido a las bajas temperaturas que impiden flujos constantes en los drenajes.

En la Fig. 33 y Fig. 34, se puede observar la variación de ^{18}O y los cambios de temperatura a escala global en Ma y escala regional en Ka, respectivamente, dichas graficas muestran la relación existente entre estos componentes y ratifican los cambios climáticos que ha sufrido la tierra. Así mismo, se identifican los diferentes eventos climáticos y tectónicos, los cuales son fundamentales para comprender la evolución del paisaje.

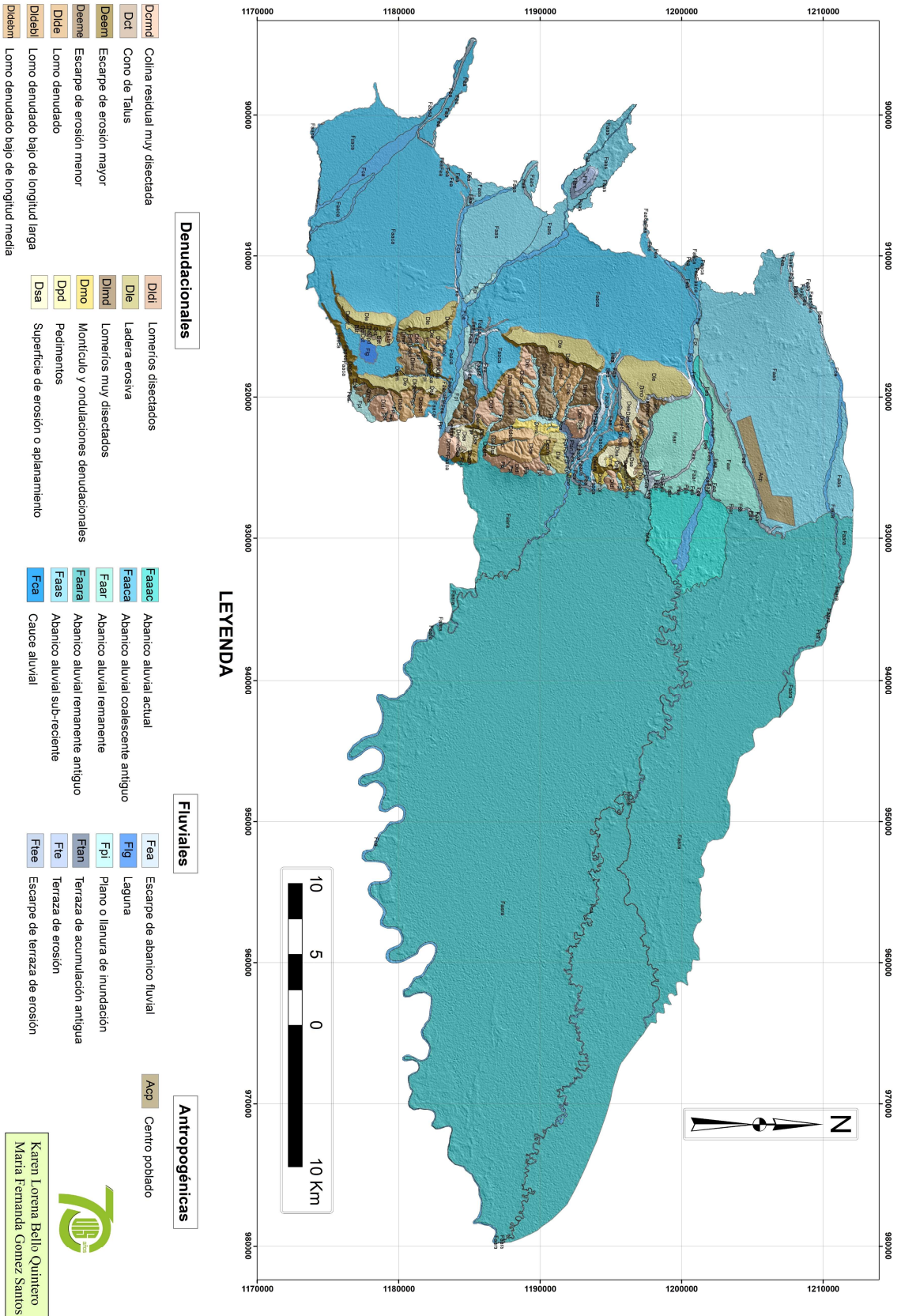


Fig. 32 Mapa geomorfológico de la zona de estudio.

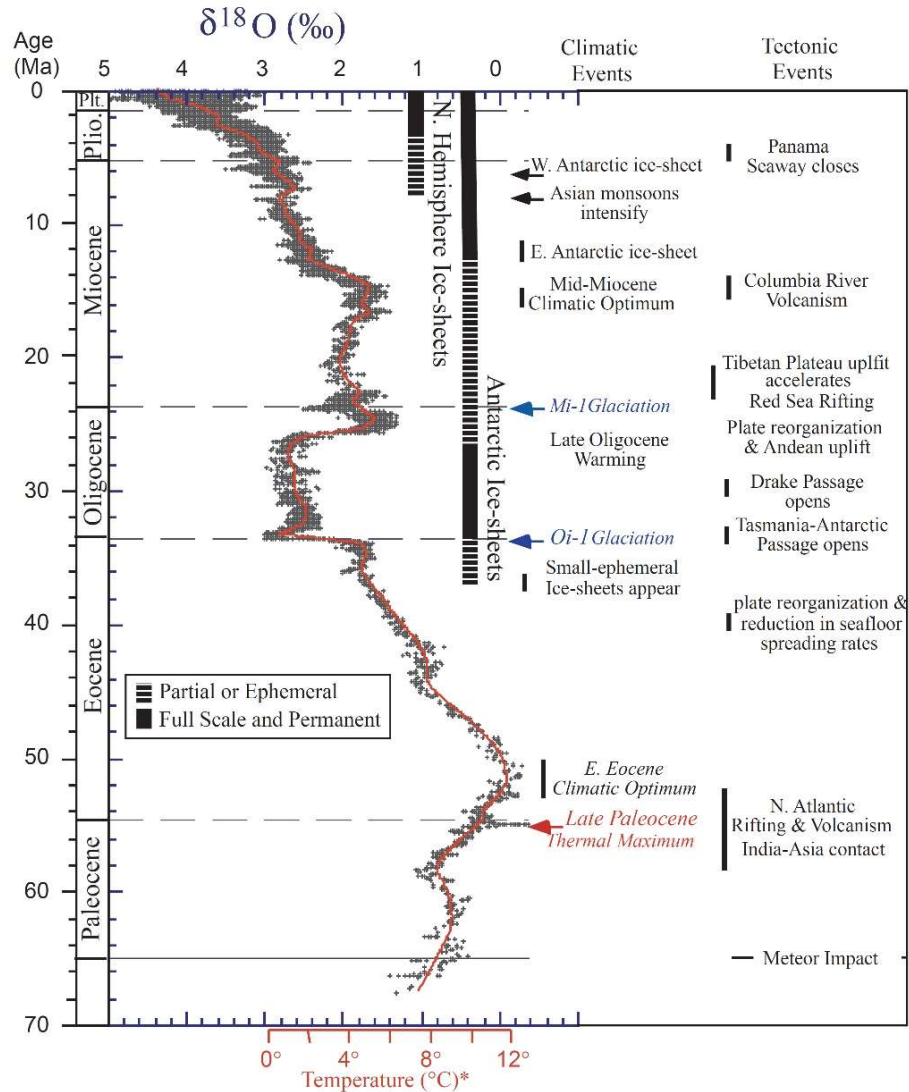


Fig. 33 Registros globales de isótopos de oxígeno y carbono en aguas profundas. Adaptado de Zachos et al., (2001).

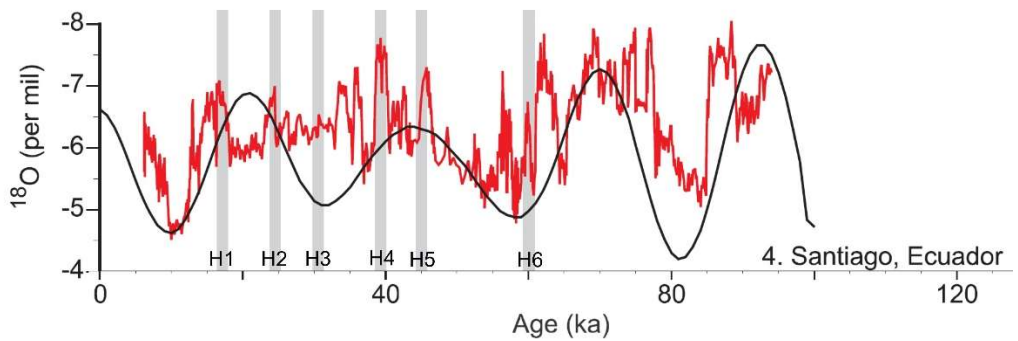


Fig. 34 Registros locales de isótopos de oxígeno en espeleotemas seleccionados. Adaptado de Baker & Fritz (2015).

A partir de la interpretación de la Fig. 34, se observan variaciones en los registros del isótopo ^{18}O desde hace 120 Ka hasta el presente, en Ecuador, estas variaciones de eventos estadiales e interestadiales están acompañadas a su vez de los eventos Heinrich, H0 - H1 - H2 - H3 - H4 - H5 - H6, los cuales son conocidos como episodios ocurridos durante la última glaciación (Wisconsin), donde los icebergs que se desprendieron de los glaciares y atravesaron en Atlántico Norte, llevaban consigo partículas terrígenas que fueron depositadas en los fondos marinos cuando estos cuerpos de hielo se fundieron en alta mar. Estos eventos hacen referencia a las fluctuaciones del clima global y están relacionados con los estadiales más fríos que se han registrado.

En relación con las características regionales de los abanicos aluviales de piedemonte en Colombia y con el fin de contribuir a su evolución geomorfológica, estos estudios realizados a isótopos estables de ^{18}O , permiten evidenciar las edades relativas de los eventos sedimentarios que dieron origen a su formación, así mismo, edades relativas de los procesos erosivos que modificaron su configuración inicial, siendo estas consideradas entre las etapas interestadiales o de mayor pluviosidad durante el cuaternario.

11. Conclusiones

El área de estudio se encuentra controlada principalmente por procesos de erosión fluvial, los cuales han generado las unidades geomorfológicas más representativas de la zona (abanico aluvial remanente antiguo, abanico aluvial coalescente antiguo, abanico aluvial sub-reciente, abanico

aluvial remanente y abanico aluvial actual), siendo estas las unidades predominantes en la zona ya que representan el 86.61 % del área total de estudio.

La caracterización morfométrica de los abanicos aluviales permitió identificar la influencia neotectónica sobre su morfología, afectando así sus características propias tales como la pendiente, la cual varía desde 7° para los abanicos más afectados por efecto de la Fallas Paz de Ariporo y el Sistema de Fallas del Borde Llanero, hasta pendientes de 3° para abanicos que no presentan modificaciones en su configuración inicial. Así mismo se destacan los depósitos de mayor extensión, siendo estos los abanicos AB₁ y AB₄, los cuales son considerados de mayor edad formacional, esto justifica los volúmenes aproximados que representa cada uno de ellos con respecto al abanico más reciente, el AB₁₁, el cual ocupa un área y volumen mínimo comparado con los anteriores.

El análisis conjunto de los parámetros morfométricos evaluados para cada cuenca de proveniencia, permitió evidenciar características similares entre cada una de ellas, dentro de éstas su forma, la cual es predominantemente alargada a muy alargada, ésta indica que dichas cuencas tienen gran desarrollo fluvial, presentando un cause principal más largo que sus tributarios, así mismo este tipo de cuencas están sujetas a crecientes de menor magnitud. Otra característica en común corresponde al trazo de sus curvas hipsométricas, las cuales muestran una tendencia similar, indicando que las cuencas se encuentran en una etapa de equilibrio, es decir, corresponden a cuencas con un avanzado grado de desarrollo o cuencas maduras.

Los cálculos volumétricos tanto de las cuencas como de los abanicos, así como las edades de formación estimadas por diferentes autores, permitieron evaluar la tasa erosiva promedio sobre estos depósitos, dicho valor corresponde a un dato variable, lo cual es analizado y justificado mediante las variaciones climáticas que se han presentado a lo largo del tiempo geológico. Los estudios realizados sobre registros de Isótopo ^{18}O , han permitido determinar con claridad las variaciones climáticas durante el periodo Cuaternario, siendo este el de mayor actividad fluvial y principales transformaciones del paisaje.

El proceso de formación de los abanicos aluviales se enmarca en diferentes eventos de erosión-depositación, desarrollados desde edades Eocenas Tardías hasta la actualidad, durante este intervalo de tiempo la actividad tectónica de la región, generada por la Falla Carirvita, la Falla Paz de Ariporo y el Sistema de Fallas del Borde Llanero, ha ocasionado levantamientos y plegamiento en los depósitos aluviales, que posteriormente se han basculado, originando sobre éstos inconsistencias en su configuración inicial, dando como resultado algunas unidades de tipo denudacional.

12. Recomendaciones

Debido a las condiciones de orden público en la región, los resultados obtenidos a partir de la interpretación y análisis de los diferentes insumos empleados durante este trabajo, no pudieron ser ampliados en la práctica de campo. Para un análisis más detallado de esta información, es

recomendable realizar una jornada de campo sobre el área de trabajo, con el fin de complementar los diferentes mapas obtenidos y el modelo evolutivo de esta zona. Así mismo se proponen puntos estratégicos para realizar trincheras o sondeos de diferentes profundidades, como lo son los abanicos AB₁ y AB₄ en sus zonas centro distales, justo donde se encuentran las mayores afectaciones por procesos neotectónicos, con el objetivo de elaborar un levantamiento detallado de las secuencias estratigráficas y así evidenciar la influencia de los eventos tectónicos que afectaron la región.

Al momento de estimar la tasa erosiva de los abanicos aluviales a través del tiempo, se observó poca precisión en los datos de las edades de formación de estos depósitos, esto debido a la falta de estudios cronológicos. Por tal motivo, para obtener mayor exactitud en estos datos, se recomienda realizar dataciones radiométricas de ¹⁴C o de termoluminiscencia, la cual se ajusta en gran medida a estos depósitos cuaternarios. Así mismo, con estas edades de formación, junto a las evidencias globales del cambio climático, se puede realizar un análisis más detallado sobre las condiciones climáticas que han afectado estos depósitos y la región en la que se encuentran.

Bibliografía

- Asf. (S.F.). Dataset: Asf Daac 2015, Alos Palsar_Radiometric_Terrain_Corrected_High_Res. Includes Material © Jaxa/Meti 2007. Doi:10.5067 / Z97hfenkr6va. (Acceso: Septiembre 2017).
- Bahrami, S. (2013). Tectonic Controls On The Morphometry Of Alluvial Fans Around Danekkhoshk Anticline, Zagros, Iran. *Elsevier*, 217 -230.
- Baker, P. A., y Fritz, S. C. (2015). Nature And Causes Of Quaternary Climate Variations Of Tropical South America. *Quaternary Science Reviews*, 31-47.
- Birch, S.P.D., Hayes, A.G., Howard, A.D., Moore, J.M. y Radebaugh, J. (2016). Alluvial Fan Morphology, Distribution And Formation On Titan. *Elsevier*, 238 - 247.
- Blissenbach, E. (1954). Geology Of Alluvial Fans In Semiarid Regions. *Bulletin Of The Geological Society Of America*, 175-190.
- Bull, W. B. (1964). Geomorphology Of Segmented Alluvial Fans In Western Fresno Country, California. Washington: *Geological Survey Professional Paper* 352-E.
- Caballero, V., Parra, M., y Mora B., A. (2010). Levantamiento De La Cordillera Oriental De Colombia Durante El Eoceno Tardío - Oligoceno Temprano: Proveniencia Sedimentaria En El Sinclinal De Nuevo Mundo, Cuneca Valle Medio Del Magdalena. *Boletín De Geología*, 45-77.

Cacho, I., Grimalt, J., Pelejero, C., Canals, M., Sierro, F., Flores, J., y Shackleton, N. (1999).

Dansgaard-Oeschger And Heinrich Event Imprints In Alboran Sea Paleotemperatures.

Paleocenography, 698-705.

Campués, C. J. (2007). Análisi De La Susceptibilidad De Los Denómenos De Remoción En

Masa De La Carretera Loja-Zamora. Quito: *Escuela Politecnica Nacional*.

Cardona, B. L. (2008). Conceptos Básicos De Morfometría De Cuencas Hidrográficas.

Guatemala: Facultad De Ingeniería, Universidad De San Carlos De Guatemala.

Cartwright, R., y Burr, D. (2017). Using Synthetic Aperture Radar Data Of Terrestrial Analogs

To Test Alluvial Fan Formation Mechanisms On Titan. *Elsevier*, 183 - 205.

Carvajal, J. H., Leiva, O. Y., Moya, H. G., y Trejos, G. A. (2012). Propuesta Metodológica

Sistemática Para La Generación De Mapas Geomorfológicos Analíticos Aplicados A La

Zonificación De Amenaza Por Movimientos En Masa Escala 1:100.000. Bogotá.

Colombo, F. (1992). Sedimentología (Vol. Volumen I). Madrid: Consejo Superior De

Investigaciones Científicas.

Cooper, M. A., Addison, F. T., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, A. B., . . .

Taborda, A. (1995). Basin Development And Tectonic History Of The Llanos Basin,

Eastern Cordillera, And Middle Magdalena Valley, Colombia. *AAPG*, 1421-1443.

Fabre, A. (1981). Geología Regional De La Sierra Nevada Del Cocuy Plancha 137 - El Cocuy.

Bogotá: Ingeominas.

- Gestión De La Información Geocientífica – Singeo . (2012). Estándares De Cartografía Geológica Digital Para Planchas A Escala 1:100.000 Y Mapas Departamentales Versión 2. Bogotá.
- Gómez Villar, A. (1996). Abanicos Aluviales: Aportación Teórica A Sus Aspectos Más Significativos. *Cuaternario Y Geomorfología*, 77-124.
- Gsg, C. (2015). Elaboración De La Cartografía Geológica De Un Conjunto De Planchas A Escala 1:100.000 Ubicadas En Cuatro Bloques Del Territorio Nacional, Identificados Por El Servicio Geológico Colombiano. Medellin.
- Guzmán, D., Ruíz, J., y Cadena, M. (2014). Regionalización De Colombia Según La Estacionalidad De La Precipitación Media Mensual, A Través Análisis De Componentes Principales (Acp). Grupo De Modelamiento De Tiempo, Clima Y Escenarios De Cambio Climático - Ideam.
- Harvey, A., Mather, A., y Stokes, M. (2005). Alluvial Fans: Geomophology, Sedimentology, Dynamics. London: *The Geological Society Of London*.
- Hernandez Molina, F. J. (2008). Cambios Climáticos Abruptos Y Sus Efectos En La Sedimentación Marina. Cadiz.
- Ideam. (2005). Atlas Climatológico De Colombia - Instituto Colombiano De Hidrología Meteorología Y Estudios Ambientales. Bogotá.

Instituto De Investigaciones Marinas Y Costeras José Benito Vives De Andrés - Invemar.

(2007). Ordenamiento Ambiental De La Zona Costera Del Departamento Del Atlántico .
Santa Marta: Invemar.

Jardí, M. (1985). Forma De Una Cuenca De Drenaje. Análisi De Las Variables Morfométricas
Que Nos La Definen. *Revista Geográfica*, 44-68.

Jimenez Díaz, G., y Gonzales Sanchez, F. A. (2005). Caracterización Geoquímica Y
Estratigráfica Del Intervalo Paleoceno Superior Para Una Transecta Entre El Pozo
Coporo 1 Y Gibraltar 1, Piedemonte Llanero (Tesis de Pregrado). Universidad Industrial
De Santander, Bucaramanga.

Junco, J. D. (2004). Análisis Morfométrico De Cuencas: Caso De Estudio Del Parque Nacional
Pico De Tancítaro. Michoacán.

Mena, C., Molina, L., Ormazábal, Y., y Morales, Y. (2011). Generalización De Modelo Digital
De Elevación Condicionada Por Puntos Críticos De Terreno. *Bulletin Of Geodetic
Sciences*, 439-457.

Montes, N. E., y Sandoval , A. (2001). Base De Datos De Fallas Activas De Colombia,
Recopilación Bibliográfica. Ingeominas, Bogotá.

Montoya, D. N. (2013). Geología De La Plancha 193 Yopal. Ingeominas, Subdirección Geología
Básica.

Morales, L. G. (1958). General Geology And Oil Occurrences Of The Middle Magdalena Valley,
Colombia, In Weeks. *Aapg*, 641-695.

- Nichols, G. (2009). *Sedimentology And Stratigraphy: Second Edition*. United Kingdom: Wiley-Blackwell.
- Perez, J. (1979). *Fundamentos Del Ciclo Hidrológico*. Universidad Central De Venezuela. Facultad De Ingeniería Departamento De Meteorología E Hidrología universidad Central De Venezuela. Facultad De Ingeniería Departamento De Meteorología E Hidrología.
- Racca, J. M. (2007). Análisis Hipsométrico, Frecuencia Altimétrica Y Pendientes Medias A Partir De Los Modelos Digitales De Terreno. *Boletín Del Instituto De Fisiografía Y Geología*, 31-38.
- Rodriguez, O., y Arredondo, H. (2005). *Manual Para El Manejo Y Procesamiento De Imágenes Satelitales Obtenidas Del Sensor Remoto Modis De La Nasa, Aplicado En Estudios De Ingeniería Civil*. Bogotá.
- Sancho, C., Peña, J. L., Rivelli, F., Rhodes, E., y Muñoz, A. (2008). Geomorphological Evolution Of The Tilcara Alluvial Fan (Jujuy Province, Nw Argentina): Tectonic Implications And Palaeoenvironmental Considerations. *Journal Of South American Earth Sciences*, 68-77.
- Sarmiento, Et Al. (2011). *Llanos Basin*. Agencia Nacional De Hidrocarburos.
- Sgc. (2012). Anexo A. *Glosario De Unidades Y Subunidades Geomorfológicas*. Bogotá.
- Sgc. (2014). *Memoria Explicativa De La Zonificación De La Susceptibilidad Y La Amenaza Por Movimientos En Masa Escala 1:100.000, Plancha 138 – Tame. . Bogotá*.

- Sgc. (2014). Memoria Explicativa De La Zonificación De La Susceptibilidad Y La Amenaza Por Movimientos En Masa Escala 1:100.000, Plancha 154 – Hato Corozal. . Bogotá.
- Taboada, A., Dimaté, C., y Fuenzalida, A. (1998). Sismotectónica De Colombia: Deformación Continental Activa Y Subducción. *Fisica De La Tierra*, 10, 111-174.
- Thomas, M. F. (2008). Understanding The Impacts Of Late Quaternary Climate Change In Tropical And Sub-Tropical Regions. *Geomorphology*, 146-158.
- Ulloa, C., y Rodríguez, E. (1976). Geología De La Plancha 171 - Duitama, 191 - Tunja, 211 - Tauramena Y 230 - Monterrey. Cuadrángulos J-12 Y K-13. Escala 1:100.000. Bogotá: Ingeominas.
- Universidad Autónoma Del Estado De México. (2014). Geomorfología: Experiencias De Investigación En México. Toluca, Estado De México: Uaem.
- Valencia, J. A. (2017). Aplicación De Redes Neuronales y SIG En El Análisis De Riesgos De Inundación Y Movimientos De Ladera En El Municipio De Capitanejo (Santander-Colombia). Salamanca.
- Vargas, C. A., Nieto, M., Monsalve, H., Montes, L., y Valdes , M. (2008). The Abanico Del Quindio Alluvial Fan, Armenia, Colombia: Active Tectonics And Earthquake Hazard. *Elsevier*, 64-73.
- W. Méndez, Z. G. (2016). Geomorphology Of The Alluvial Fans Of The El Ávila Massif Northern Foothill, Vargas State, Venezuela. *Revista De Investigación* N° 87 Vol. 40.

Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., & Billups, K. (2001). Trends, Rhythms And Aberrations In Global Climate 65 Ma To Present. *Science*, 686-693.

Zinck, J. A. (2012). *Geopedología, Elementos De Geomorfología Para Estudios De Suelos Y De Riesgos Naturales. Itc.*